

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Brzdění asynchronních elektromotorů stejnosměrným proudem

Asynchronous Motors Braking with Direct Current

Zadání bakalářské práce

Student:

Václav Kadlec

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: Brzdění asynchronních elektromotoru stejnosměrným proudem
Asynchronous Motors Braking with Direct Current

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor brzdění asynchronního elektromotoru stejnosměrným proudem.
2. Proved'te měření asynchronního elektromotoru pro stanovení prvku náhradního schématu.
3. Proved'te měření asynchronního elektromotoru pro dvě brzdňá zapojení.
4. Porovnejte výsledky měření s teoretickými výpočty.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Bašta,J., Kulda,V., Pavlásek,F. a kol.: Měření na indukčních strojích, Praha, SNTL 1962
2. Chmelík, K.: Asynchronní a synchronní elektrické stroje, skriptu VŠB-TU Ostrava, 2002
3. Michalec,J., Peřina,J.: Elektrické stroje I, skriptu CVUT Praha, 1989

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Cech, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

.....
vedoucí katedry

.....
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
dekan fakulty

Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....
Václav Kadlec

*Datum odevzdání bakalářské práce: **6.5.2011***

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. za poskytnutí materiálů, cenných rad a konzultací, které mi ochotně během tvorby bakalářské práce poskytl.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá brzděním asynchronního motoru stejnosměrným proudem a to jak po stránce teoretického vypracování, tak i z hlediska měření pro ověření teoretických předpokladů. Toto brzdění má díky napájení střídavého stroje stejnosměrným proudem své specifické vlastnosti, které jsou v této práci rozebrány podrobněji v teoretickém rozboru, který spočívá ve vysvětlení jednotlivých částí nezbytných k odůvodnění stejnosměrného brzdění. Důraz v této práci je ve značné míře kladen na vypracování laboratorních měření pro dané spojení při brzdění stejnosměrným proudem a na zhodnocení naměřených a vypočítaných hodnot.

Klíčová slova

Schéma pro brzdění, spojení vinutí, ekvivalentní proud, budící proud, náhradní schéma, poměrná rychlost, brzdny moment, momentové charakteristiky

Abstrakt

Bachelor's thesis put mind to braking non-synchronous engine with direct current in light of theoretical elaboration and admeasurement for check on theoretical's expectations. This braking has thanks to feed alternate machine with direct current his specific properties, that are in this work described in more detail in theroretical analysis, that consists in explanation individual parts needed to valid direct braking. Emphasis in this work is appreciably place on elaboration laboratory admeasurement for given connection during braking with direct current and on analysis of measured and calculated values.

Keywords

Scheme for braking, winding connection, equivalent current, actuating current, substitute scheme, relative speed, braking moment, torque characteristics

Seznam použitých zkratk a symbolů

Teoretický rozbor

R_b	Budící odpor
ϕ_b	Budící magnetický tok
U	První fáze
V	Druhá fáze
W	Třetí fáze
N	Střední (nulový) vodič
$KM1$	První (střídavý) stykač
$KM2$	Druhý (stejnoseměrný) stykač
U	Usměrňovač
R_s	Spouštěcí odpor
I_{ss}	Stejnoseměrný budící proud
M_z	Moment zatížení
U_{10}	Napětí statoru
i_{ss}	Okamžitá hodnota stejnosměrného budícího proudu
t	Čas
s	Sekunda
A	Ampér
N_1	Počet závitů statorového vinutí
F_{ss}	Amplituda stejnosměrného magnetomotorického napětí
I_{ekv}	Ekvivalentní střídavý proud
f_1	Frekvence
ω_s	Synchronní rychlost
π	Matematická konstanta
p	Počet pólových dvojic
F_{ST}	Amplituda střídavého magnetomotorického napětí
I_1	Střídavý proud statorem

R_c	Celkový odpor jednotlivých spojenístatoru
R_1	Odpor fáze vinutí
U_{ss}	Stejnoseměrné budící napětí
I_W	Proud ve fázi W
I_V	Proud ve fázi V
I_U	Proud ve fázi U
I_{Um}	Maximální proud ve fázi U
$X_{21\sigma}$	Rozptylová reaktance statorového vinutí
U_{i21}	Indukované napětí rotoru přepočtené na stator
I_μ	Magnetizační proud
X_μ	Magnetizační reaktance
I_2	Proud rotoru
I_1	Proud statoru
s'	Poměrná rychlost
I_{2lr}	Rotorový rotační proud přepočtený na stator
R_{21}	Činný odpor rotoru přepočtený na stator
I_0	Proud na prázdno
I_{21}	Proud rotoru přepočtený na stator
I_{2li}	Indukované napětí rotoru přepočtené na stator
M	Elektromagnetický moment
$X_{\mu 0}$	Rozptylová reaktance při nulovém magnetizačním proudu
M_{Brm}	Maximální brzdový moment
M_{Br}	Brzdový moment
s'_m	maximální poměrná rychlost
s'	Poměrná rychlost při brzdění stejnosměrným proudem
U_{i1}	Indukované napětí statoru
I_μ	Magnetizační proud

X_{μ}	Magnetizační reaktance
U_{i2}	Indukované napětí rotoru
ω	Úhlová rychlost rotoru
I_{2lr}	Rotorový proud vzniklý odbuzováním motoru
U_{nf}	Jmenovité fázové napětí
M_i	Vnitřní moment (elektromagnetický)
s_m	Maximální skluz
X_k	Reaktance nakrátko
M_z	Moment zatížení
R_{22}	Jiná hodnota spouštěcího odporu
M_n	Jmenovitý moment
$C_{1,2,3}$	Budicí kondenzátory

Měření asynchronního elektromotoru pro stanovení prvků náhradního schématu

R_1	Činný odpor statorového vinutí
$X_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance statorového vinutí
$X_{21\sigma}$	Rozptylová reaktance rotorového vinutí přepočtená na stator
R_{Fe}	Odpor v železe
X_μ	Magnetizační reaktance
I_μ	Magnetizační proud
I_{Fe}	Proud v železe
R_d	Přídavný odpor
I_{21}	Proud rotorového vinutí přepočtený na stator
U_i	Indukované napětí
U_2	Napětí rotoru
R_{21}	Odpor rotoru přepočtený na stator
I_2	Proud rotoru
R_2	Odpor rotorového vinutí
ΔP_j	Výkon vzduchovou mezerou
ΔP_{j1}	Ztráty ve vinutí statoru (v mědi)
ΔP_d	Přídavné ztráty
m	Počet fází
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe
ΔP_1	Příkon ze sítě
I_{10n}	Proud statoru naprázdno při jmenovitém napětí
ΔP_{0n}	Jmenovité ztráty naprázdno
ΔP_m	Mechanické ztráty
R_{10f}	Odpor jedné fáze při stavu naprázdno
R_{1kf}	Odpor jedné fáze při stavu nakrátko

U_{k0}	Napětí nakrátko
I_k	Proud nakrátko
R_k	Odpor nakrátko
Z_k	Impedance nakrátko
I_{1n}	Jmenovitý proud statoru
X_k	Reaktance nakrátko
$X_1\sigma$	Rozptylová reaktance statorového vinutí
ΔP_{j10}	Joulovy ztráty naprázdno
ΔP_{0n}	Jmenovité ztráty naprázdno
U_{1n}	Jmenovité napětí statoru
R_{Fe}	Odpor v železe
φ_0	Ztrátový činitel naprázdno
Z_{11}	Impedance na svorkách statoru
I_{10n}	Proud statoru naprázdno při jmenovitém napětí
X_{11}	Reaktance na svorkách statoru
ΔP_{j1k}	Joulovy Ztráty statoru nakrátko
ΔP_{j2k}	Joulovy ztráty rotoru nakrátko
I_{1kn}	Proud statorem nakrátko při jmenovitém napětí
φ_k	Ztrátový činitel nakrátko
Ω_m	Mechanická úhlová rychlost
n_n	Jmenovité otáčky
n_s	Synchronní otáčky
U_{20}	Napětí rotoru naprázdno
I_{2n}	Jmenovitý proud rotoru
P_n	Jmenovitý výkon
z	Zatěžovatel

Měření asynchronního elektromotoru pro dvě brzdná zapojení

P_n	Jmenovitý výkon
z	Zatěžovatel
n_n	Jmenovité otáčky
n_s	Synchronní otáčky
U_{1n}	Jmenovité napětí statoru
I_{1n}	Jmenovitý proud statoru
U_{20}	Napětí rotoru
I_{2n}	Jmenovitý proud rotoru
$V1$	Hlavní jistič
$Q1$	Voltmetru
$Q2$	Celkový proud
$Q3$	Celkový příkon
$Q4$	Proud v rotoru
$Q5$	Otáčky
$A1$	Přepínač síťových napětí
$A2$	Spínač
$A3$	Přepínač
$A5$	Tlačítko
$A6$	Tlačítko
$A7$	Tlačítko
$SA1$	Přepínač
$U1$	Usměrňovač
$SB7$	Tlačítko
$SA3$	Otočný ovladač
$SB8$	Tlačítko
U_{ss}	Stejnoseměrné budící napětí
V	Voltmetr
$U1$	Usměrňovač

KM	Stykač
U, V, W	Napájecí svorky
$SA6$	Otočný ovladač
$SA2$	Otočný ovladač
$SA3$	Otočný ovladač
$H1$	Signálka
$H2$	Signálka
$H3$	Signálka
$H4$	Signálka
$HL2$	Signálka
$HL3$	Signálka
$SB3$	Tlačítko
$SB4$	Tlačítko
$SB5$	Tlačítko
$SB6$	Tlačítko
$SB7$	Tlačítko
$SB8$	Tlačítko
MA	Spínač
M	Motor
DM	Dynamometr
TG	Tachograf
R_s	Spouštěcí odpor
V	Voltmetr
A	Ampérmetr
$X_{21\sigma}$	Rozptylová reaktance rotorového vinutí
I_{ekv}	Ekvivalentní střídavý proud
I_1	Ekvivalentní střídavý proud
X_μ	Magnetizační reaktance
I_μ	Magnetizační proud
I_2	Rotorový proud
U_{i21}	Indukované napětí rotoru přepočtené na stator

U_{i1}	Indukované napětí statoru
I_{ss}	Stejnoseměrný budící proud
U_{ss}	Stejnoseměrné budící napětí
M_{Br}	Brzdny moment
n	Otáčky
f	Frekvence
X_{mi}	Magnetizační reaktance
R_{21}	Odpor rotoru přepočtený na stator
I_{ss}	Stejnoseměrný budící proud
p	Počet pólových dvojic
m	Počet fází
n_s	Synchronní otáčky
ω_s	Synchronní rychlost
ω	Asynchronní rychlost
s'	Poměrná rychlost při brzdění stejnosměrným proudem
I_{ekv}	Ekvivalentní střídavý proud
I_{mi}	Magnetizační proud
I_{21}	Proud rotoru přepočtený na stator
M_{br}	Brzdny moment
M_{brm}	Maximální brzdny moment

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1.1 - Schéma pro brzdění stejnosměrným proudem [1]	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 1.2 - Spojení vinutí statoru asynchronního motoru při brzdění stejnosměrným proudem [3]	3
Obrázek 1.3 - Odpojení asynchronního motoru 1000 kW od sítě a zapnutí I_{ss} do vinutí statoru při brzdění stejnosměrným proudem [7]	3
Obrázek 1.4 - Výsledné magnetické napětí jednotlivých spojení statorového vinutí. [2]	4
Obrázek 1.5 - K určení budicího proudu [3]	6
Obrázek 1.6 - Náhradní schéma pro brzdění stejnosměrným proudem [2]	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 1.7 - Fázorový diagram pro brzdění stejnosměrným proudem [2]	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 1.8 - Magnetizační charakteristika a $X_{\mu}(I_{\mu})$ asynchronních motorů [2]	9
Obrázek 1.9 - Rychlostní charakteristika brzdění stejnosměrným proudem [2]	10
Obrázek 1.10 - Mechanické charakteristiky při brzdění stejnosměrným proudem [3]	12
Obrázek 1.11 - Momentové charakteristiky pro porovnání stejnosměrného a protiproudového brzdění [5]	12
Obrázek 1.12 - Brzdění asynchronních motorů s vlastním buzením [2]	13
Obrázek 2.1 - Náhradní schéma a rozdělení výkonů asynchronního motoru [6]	14
Obrázek 3.1 - Ovládací panel dynamometru [1]	21
Obrázek 3.2 – Schéma zapojení při brzdění stejnosměrným proudem [1]	22
Obrázek 3.3 - Náhradní schéma pro brzdění stejnosměrným proudem [2]	22
Obrázek 3.4 – Naměřené momentové charakteristiky při brzdění stejnosměrným proudem	23
Obrázek 3.5 - Momentové charakteristiky naměřených a vypočtených hodnot	24
Obrázek 3.6 - Schéma zapojení při brzdění stejnosměrným proudem [1]	26
Obrázek 3.7 - Náhradní schéma pro brzdění stejnosměrným proudem [2]	26
Obrázek 3.8 – Naměřené momentové charakteristiky při brzdění stejnosměrným proudem	27
Obrázek 3.9 - Momentové charakteristiky naměřených a vypočtených hodnot	28
Obrázek 3.10 - Brzdění stejnosměrným proudem přes frekvenční měnič [8]	30
Obrázek 3.11 - Spojení statoru při brzdění frekvenčním měničem [3]	30
Obrázek 3.12 – Naměřená momentová charakteristika při brzdění stejnosměrným proudem	31
Obrázek 3.13 – Momentové charakteristiky naměřených a vypočtených hodnot	32

Seznam použitých tabulek

Tabulka 2.1 - Štítkové hodnoty.....	15
Tabulka 3.1 - Tabulka naměřených hodnot při brzdění stejnosměrným proudem.....	23
Tabulka 3.2 - Tabulka vypočtených hodnot	24
Tabulka 3.3 - Tabulka neměřených hodnot při brzdění stejnosměrným proudem	27
Tabulka 3.4 - Tabulka vypočtených hodnot	28
Tabulka 3.5 - Tabulka naměřených hodnot při brzdění stejnosměrným proudem.....	31
Tabulka 3.6 - Tabulka vypočtených hodnot	32

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teoretický rozbor brzdění asynchronních motorů stejnosměrným proudem	2-13
3. Měření asynchronního motoru pro stanovení prvků náhradního schématu	14-19
4. Měření asynchronního motoru pro dvě brzdná zapojení.	20-33
5. Porovnání výsledků měření s teoretickými výpočty	34
6. Závěr	35
7. Seznam použité literatury	36

1. Úvod

Začátkem a vlastně i základem této bakalářské práce je seznámit se s teoretickým rozbořem, který se zabývá brzděním asynchronních motorů stejnosměrným proudem. Důležité je uvědomit si, že napájíme střídavý stroj stejnosměrným proudem a tedy to, že už se motor chová jinak než když jím prochází střídavý proud. Protože do různě zapojeného statoru asynchronního motoru teče stejnosměrný proud má teoretický rozbor specifické vlastnosti dané právě tímto stejnosměrným proudem.

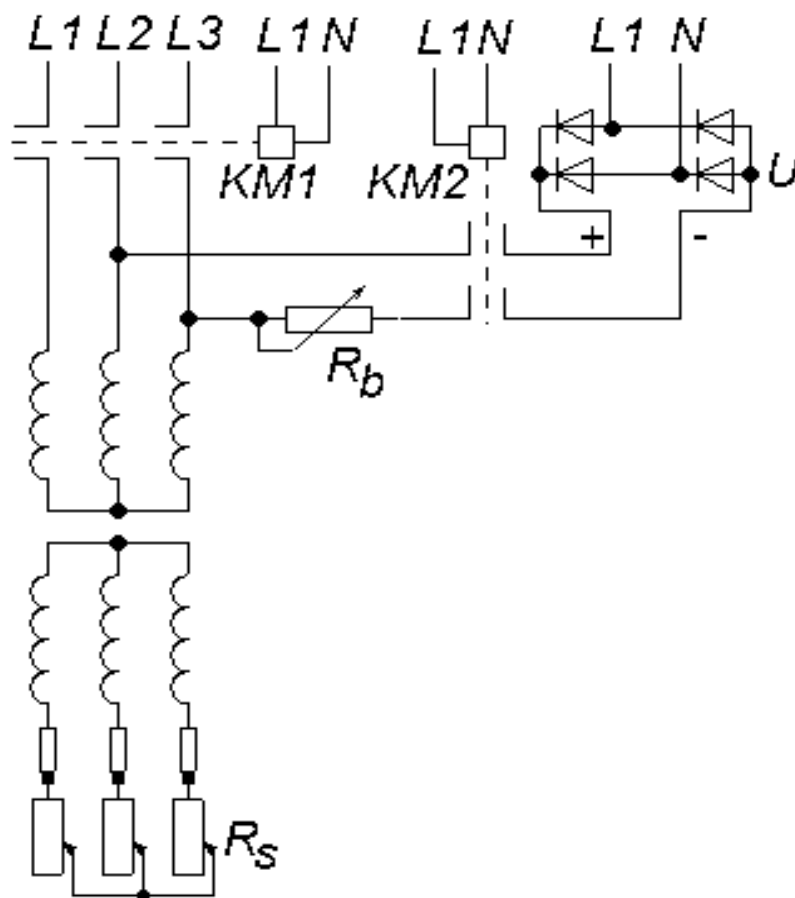
Další vypracování bakalářské práce se týká výpočtu náhradního schématu asynchronního motoru. Aby mohl být výpočet proveden bylo nezbytné provést měření v laboratoři na asynchronním motoru z kterého lze pak tento výpočet vyjádřit. Motor byl měřen jak naprázdno, tedy bez zátěže a nakrátko, tedy s takovým zatížením se kterým motor nedokázal vyvinout dostatečně velkou sílu k otočení zatížené hřídele.

Podstatou další části je měření asynchronního motoru, které spočívá v tom, jak je zapojeno jeho statorové vinutí. Na motoru bylo provedeno měření pro různá brzdna spojení statorového vinutí asynchronního motoru při různém stejnosměrném proudu. Z naměřených dat jsou provedeny výpočty brzdných momentů a stanoveny závěry, které jsou dány brzděním asynchronního motoru stejnosměrným proudem. Brzdění stejnosměrným proudem lze provést i pomocí frekvenčního měniče. V laboratoři bylo pomocí tohoto přístroje provedeno brzdění a v této práci naznačeno jak takové brzdění probíhá.

Následné a konečné vypracování spočívá ve zhodnocení naměřených a vypočítaných hodnot a ve vyhodnocení celé této bakalářské práce.

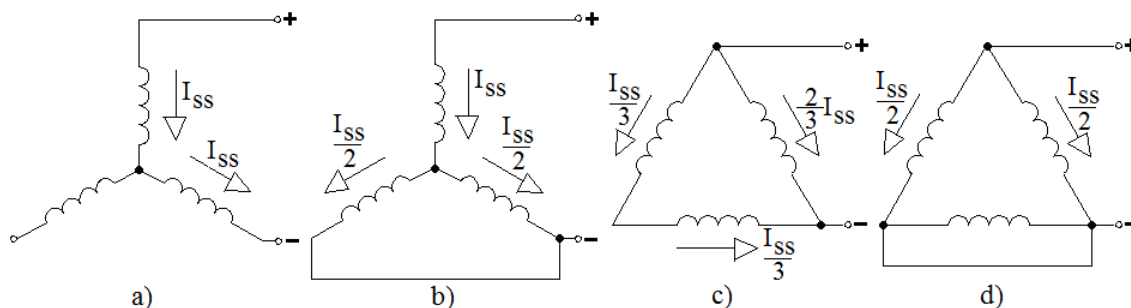
2. Teoretický rozbor brzdění asynchronních elektromotorů stejnosměrným proudem

Při brzdění asynchronního motoru stejnosměrným proudem se odpojí statorové vinutí stroje od střídavé trojfázové napájecí sítě a připojí se na zdroj stejnosměrného proudu o malém napětí, tím se vybudí stálé magnetické pole ve vzduchové mezeře. V otáčejícím rotoru se indukuje střídavé napětí s kmitočtem úměrným úhlové rychlosti a fázemi uzavřenými přes spouštěcí odpory protékají proudy, které vytvoří magnetické napětí otáčející se vůči rotoru, ale stojící vůči statoru. Vzájemným působením proudu rotoru a stojícího magnetického pole vzniká brzdný moment. Odporem R_b se nastaví velikost magnetického pole tak, aby ϕ_b byl stejný jako v trojfázovém spojení. Asynchronní motor se při brzdění chová jako synchronní generátor zatížený odpory obvodu rotoru. Jednoduché schéma zapojení při brzdění stejnosměrným proudem je zobrazeno v obr.1.1. [2],[3]



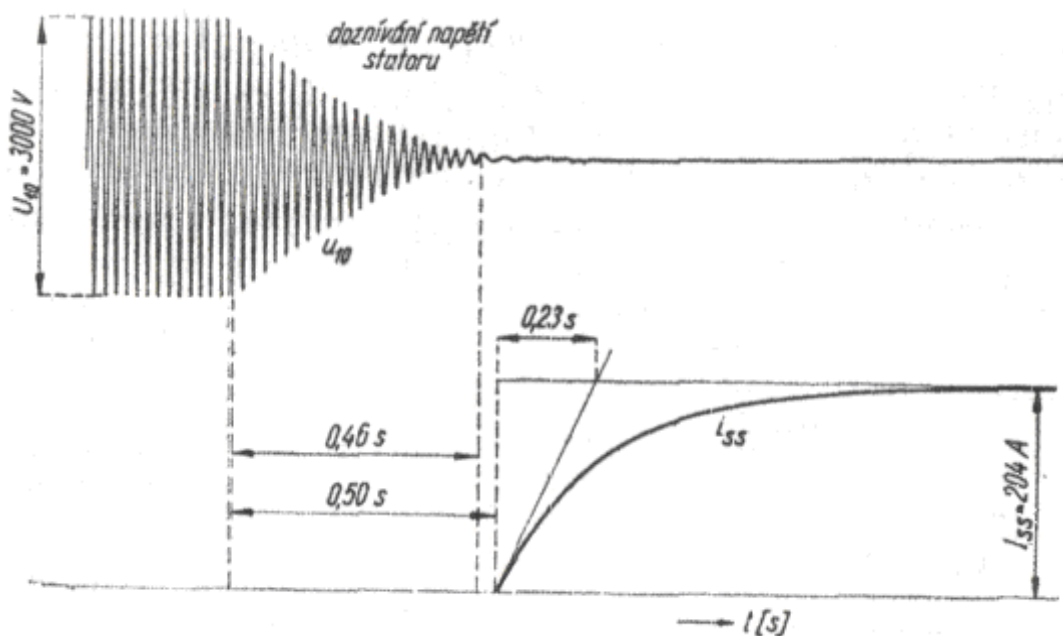
Obr.1.1 Schéma pro brzdění stejnosměrným proudem

Při brzdění asynchronního motoru stejnosměrným proudem lze zapojit vinutí statoru motoru uvedeným způsobem podle obr.1.2. Stejnosměrným proudem se budí normálně dvě fáze statoru v sérii nebo dvě fáze paralelně s třetí v sérii.[9]



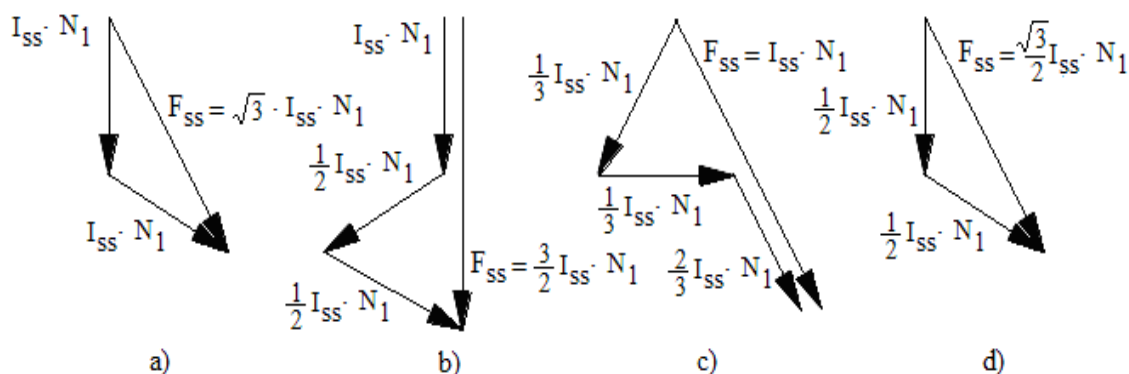
Obr.1.2 Spojení vinutí statoru asynchronního motoru při brzdění stejnosměrným proudem

Pro přehlednost byla oscilografy změřena doba doznívání napětí statoru po odpojení motoru od střídavé sítě a doba nabuzení proudem I_{ss} (obr.1.3). Podle těchto dob se musí volit co nejkratší prodleva časového relé stykače buzení I_{ss} mezi těmito dvěma pochody (asi 0,5s), aby se nezvětšila rychlost vlivem M_z , popř. neselhala dynamické brzdění.[7]



Obr.1.3 Odpojení asynchronního motoru 1000 kW od sítě a zapnutí I_{ss} do vinutí statoru při brzdění stejnosměrným proudem

Pro různé spojení satoru podle obr.1.2 se určí amplituda magnetického napětí vektorovým součtem magnetického napětí fázových vinutí. Amplituda magnetického napětí je daná protékajícím stejnosměrným proudem vinutím a počtem závitů. Na obr.1.4 jsou zobrazeny výsledné vektory magnetických napětí pro jednotlivá spojení satorového vinutí.[2]



Obr. 1.4 Výsledné magnetické napětí jednotlivých spojení satorového vinutí

Z obr.1.4 je patrné, že výsledné magnetické napětí pro jednotlivé zapojení je:

$$a) \quad F_{SS} = \sqrt{3} \cdot I_{SS} \cdot N_1 \quad (1.1)$$

$$b) \quad F_{SS} = \frac{3}{2} \cdot I_{SS} \cdot N_1 \quad (1.2)$$

$$c) \quad F_{SS} = I_{SS} \cdot N_1 \quad (1.3)$$

$$d) \quad F_{SS} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{SS} \cdot N_1 \quad (1.4)$$

Praktickým úkolem bývá nalézt pro dané zapojení motoru takovou hodnotu budicího stejnosměrného proudu I_{SS} , aby byl motor magneticky využit. Hledáme tedy vztah mezi přípustným skutečným stejnosměrným proudem I_{SS} a efektivní hodnotou magneticky ekvivalentního střídavého proudu I_{ekv} . Budicí proud I_{SS} lze pak určit pro zvolený způsob napájení třemi způsoby.[3]

1) Z rovnosti magnetomotorických napětí

Stejné magnetické napětí může být vytvořeno trojfázovým statorem protékaným střídavým proudem o kmitočtu f_1 ze zdroje proudu, přičemž se magnetické pole otáčí s rychlostí $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / p$ proti smyslu pole, které se tedy v prostoru neotáčí. Tento idealizovaný stroj bude mít shodné vlastnosti s reálným, budou-li stejná magnetomotorická napětí obou vinutí.[2]

$$F_{ST} = F_{SS}$$

Amplituda ekvivalentního střídavého magnetického napětí

$$F_{ST} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot N_1 \cdot I_1 \quad (1.5)$$

Ekvivalentní proud satoru $I_{ekv} = I_1$

$$I_{ekv} = \frac{\sqrt{2} \cdot F_{SS}}{3 \cdot N_1} \quad (1.6)$$

Po dosazení za F_{SS} jsou ekvivalentní střídavé fázové proudy pro jednotlivá spojení

$$a) \quad I_{ekv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{SS} = 0,816 \cdot I_{SS} \quad (1.7)$$

$$b) \quad I_{ekv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_{SS} = 0,707 \cdot I_{SS} \quad (1.8)$$

$$c) \quad I_{ekv} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot I_{SS} = 0,472 \cdot I_{SS} \quad (1.9)$$

$$d) \quad I_{ekv} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} \cdot I_{SS} = 0,408 \cdot I_{SS} \quad (1.10)$$

Stejnoseměrný budící proud a celkový odpor pro jednotlivá zapojení

$$a) \quad I_{SS} = 1,23 \cdot I_{ekv} \quad R_c = 2 \cdot R_1 \quad (1.11)$$

$$b) \quad I_{SS} = 1,414 \cdot I_{ekv} \quad R_c = 1,5 \cdot R_1 \quad (1.12)$$

$$c) \quad I_{SS} = 1,06 \cdot I_{ekv} \quad R_c = 0,67 \cdot R_1 \quad (1.13)$$

$$d) \quad I_{SS} = 2,45 \cdot I_{ekv} \quad R_c = 0,5 \cdot R_1 \quad (1.14)$$

Stojnosměrné napětí se určí s uvážením odporů jednotlivých spojení

$$a) \quad U_{SS} = 1,23 \cdot I_{ekv} \cdot 2 \cdot R_1 = 2,45 \cdot I_{ekv} \cdot R_1 \quad (1.15)$$

$$b) \quad U_{SS} = 1,41 \cdot I_{ekv} \cdot \frac{3}{2} \cdot R_1 = 2,12 \cdot I_{ekv} \cdot R_1 \quad (1.16)$$

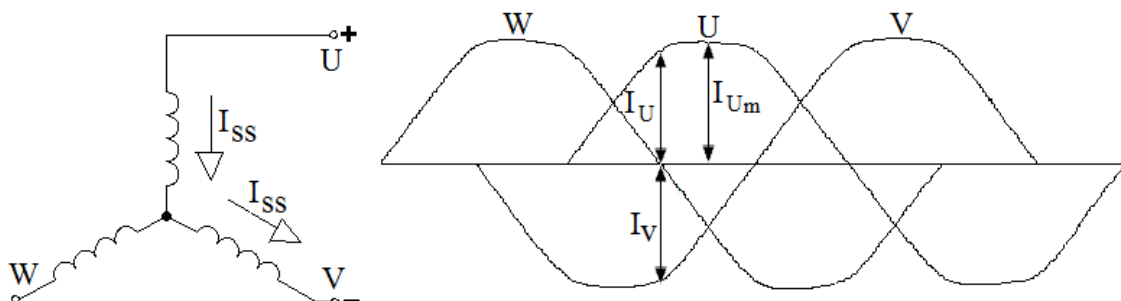
$$c) \quad U_{SS} = 2,12 \cdot I_{ekv} \cdot \frac{2}{3} \cdot R_1 = 1,41 \cdot I_{ekv} \cdot R_1 \quad (1.17)$$

$$d) \quad U_{SS} = 2,45 \cdot I_{ekv} \cdot \frac{1}{2} \cdot R_1 = 1,22 \cdot I_{ekv} \cdot R_1 \quad (1.18)$$

2) Z okamžitých hodnot trojfázového proudu

Při napájení vinutí statoru podle obr.4a budou fázové ekvivalentní proudy podle obr.1.5. Proud ve fázi W bude $I_W = 0$, zatímco proud $I_U = +I_{SS}$ a $I_V = -I_{SS}$. Pro amplitudu proudu fáze U platí $I_{Um} = \sqrt{2} \cdot I_{ekv}$. Proud ve fázi U je proti proudu I_{Um} posunut o $\pi/6$. Bude pak

$$I_{SS} = \sqrt{2} \cdot I_{ekv} \cdot \cos \frac{\pi}{6} = 1,225 \cdot I_{ekv} \quad (1.19) \quad [3]$$



Obr.1.5 K určení budicího proudu

3) Z rovnosti ztrát

Pro různé způsoby napájení bude s použitím efektivních hodnot proudů

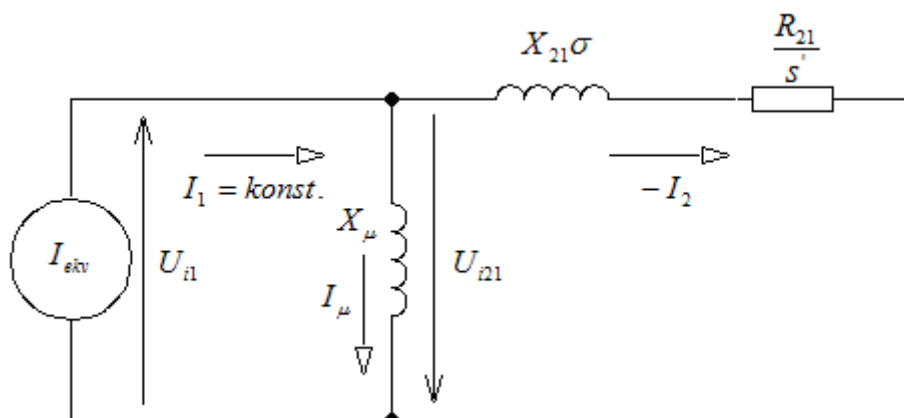
$$a) \quad 2 \cdot R_1 \cdot I_{SS}^2 = 3 \cdot R_1 \cdot I_{ekv}^2 \quad I_{SS} = 1,225 \cdot I_{ekv} \quad (1.20)$$

$$b) \quad 1,5 \cdot R_1 \cdot I_{SS}^2 = 3 \cdot R_1 \cdot I_{ekv}^2 \quad I_{SS} = 1,414 \cdot I_{ekv} \quad (1.21)$$

$$c) \quad 0,67 \cdot R_1 \cdot I_{SS}^2 = 3 \cdot R_1 \cdot I_{ekv}^2 \quad I_{SS} = 2,12 \cdot I_{ekv} \quad (1.22)$$

$$d) \quad 0,5 \cdot R_1 \cdot I_{SS}^2 = 3 \cdot R_1 \cdot I_{ekv}^2 \quad I_{SS} = 2,45 \cdot I_{ekv} \quad (1.23)$$

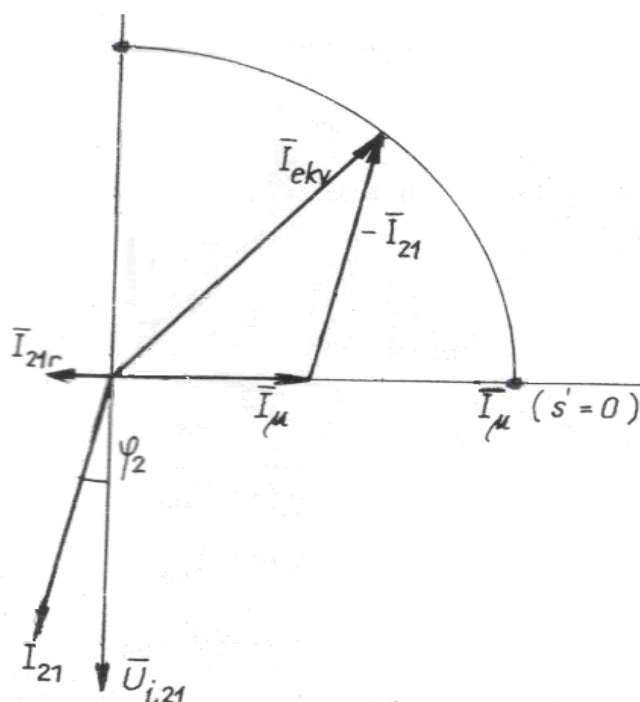
Odvození dalších vlastností provedeme na základě náhradního schématu. Náhradní schéma motoru napájeného stejnosměrným proudem do statoru je na obr.1.6. Protože je protékající proud ve vinutí statoru konstantní, není třeba uvažovat parametry statoru.[2]



Obr.1.6 Náhradní schéma pro brzdění stejnosměrným proudem

Veličina s' je definován jako poměrná rychlost rotoru a magnetického pole. Pole se otáčí vůči idealizovanému rotoru s rychlostí ω_s , rotor vůči tomuto poli s rychlostí ω . Její vztah se skluzem trojfázového motoru je $s' = 1 - s$. Poměrná rychlost je tedy

$$s' = \frac{\omega}{\omega_s} \quad (1.24)$$



Obr.1.7 Fázorový diagram pro brzdění stejnosměrným proudem

Při napájení zdrojem napětí byl magnetizační proud nezávislý na poměrné rychlosti, při napájení zdrojem proudu je na ní závislý, neboť to je patrné z vektorového diagramu, obr. 1.7.

$$|\bar{I}_{ekv}| = |\bar{I}_\mu - \bar{I}_{21}| = \text{konst.} \quad (1.25)$$

Rotorový proud je z náhradního schématu

$$I_{21} = \frac{U_{i21}}{\sqrt{\left(\frac{R_{21}}{s'}\right)^2 + X_{21\sigma}^2}} \quad (1.26)$$

Při stojícím rotoru je poměrná rychlost i rotorový proud nulový a magnetizační proud $I_\mu = I_{ekv}$ je maximální. S poměrnou rychlostí roste úhel

$$\varphi_2 = \arctg \frac{s' \cdot X_{21\sigma}}{R_{21}} \quad (1.27)$$

a proud I_{21} podle rovnice (1.25). S magnetizačním proudem se zmenšuje i indukované napětí

$$U_{i21} = U_{i1} = X_\mu \cdot I_\mu \quad (1.28)$$

Při $s' \rightarrow \infty$ jde $\varphi_2 \rightarrow \pi/2$ a vlivem I_{21r} se snižuje magnetický tok. Určení proudů motoru je obtížné vzhledem k nelineárním závislostem $U_i(I_\mu)$, $X_\mu(I_\mu)$, obr. 10, kde I_0 - proud naprázdno fáze statoru při jmenovitém napětí. [2]

Podle náhradního schématu je

$$I_{ekv}^2 = I_{21}^2 + I_\mu^2 + 2 \cdot I_{21} \cdot I_\mu \cdot \sin \varphi_2 \quad (1.29)$$

a dále

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{21\sigma}}{\sqrt{\left(\frac{R_{21}}{s'}\right)^2 + X_{21\sigma}^2}} \quad (1.30)$$

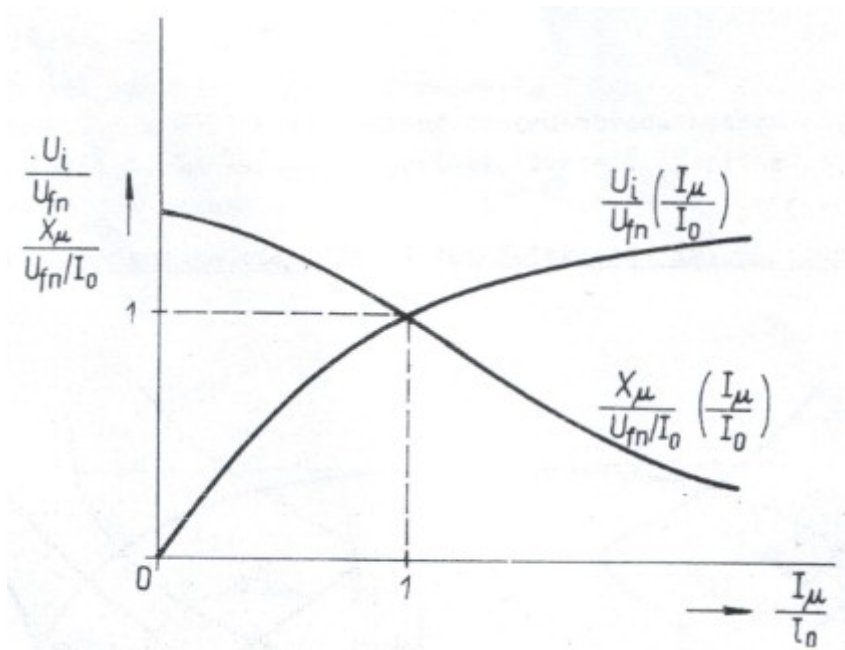
Z rovnic (1.25), (1.28) a (1.30) dostaneme postupně

$$I_\mu = I_{ekv} \cdot \sqrt{\frac{R_{21}^2 + (s' \cdot X_{21\sigma})^2}{R_{21}^2 + s'^2 \cdot (X_{21\sigma} + X_\mu)^2}} \quad (1.31)$$

$$I_{21} = I_{ekv} \cdot \frac{s' \cdot X_{\mu}}{\sqrt{R_{21}^2 + s'^2 \cdot (X_{21\sigma} + X_{\mu})^2}} \quad (1.32)$$

$$s' = R_{21} \cdot \sqrt{\frac{I_{ekv}^2 - I_{\mu}^2}{I_{\mu}^2 \cdot (X_{21\sigma} + X_{\mu})^2 - I_{ekv}^2 \cdot X_{21\sigma}^2}} \quad (1.33)$$

$$I_{21} = \sqrt{\frac{I_{ekv}^2 - I_{\mu}^2}{1 + 2 \cdot \frac{X_{21\sigma}}{X_{\mu}}}} \quad (1.34)$$



Obr.1.8 Magnetizační charakteristika a $X_{\mu}(I_{\mu})$ asynchronních motorů

Poněvadž I_{μ} a X_{μ} jsou vzájemně závislé, určí se podle zadaného proudu I_{μ} nejprve z charakteristiky na obr.10 X_{μ} a pomocí rovnic (1.33) a (1.34) poměrná rychlost s' a proud I_{21} . Největší magnetizační proud je $I_{\mu} = I_{ekv}$, nejmenší je při $s' \rightarrow \infty$ z rovnice (1.31) ve tvaru

$$I_{\mu} = I_{ekv} \cdot \frac{X_{21\sigma}}{X_{21\sigma} + X_{\mu 0}} \quad (1.35)$$

Kde $X_{\mu 0}$ -rozptylová reaktance při $I_{\mu} \rightarrow 0$. [2]

Mezní rotorový proud se určí z rovnice (1.32) s tím, že $X_{\mu 0} \gg X_{21}$ jako

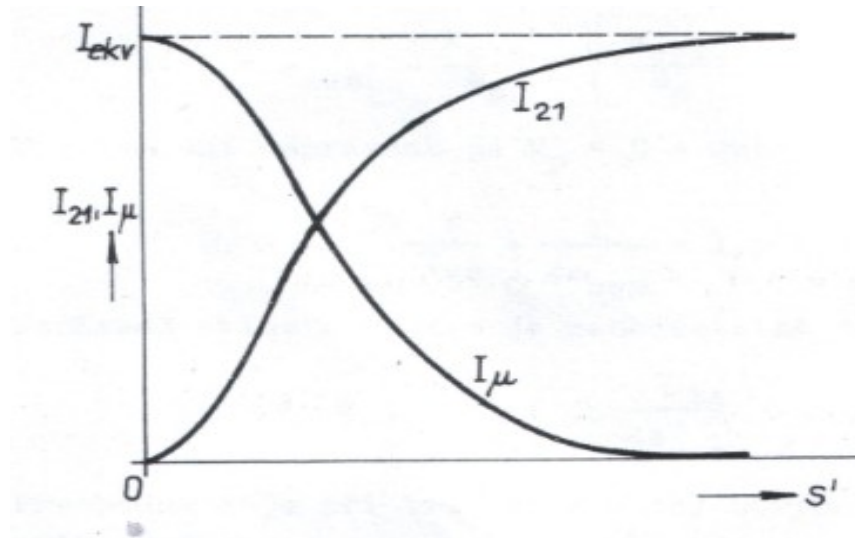
$$I_{21i} = I_{ekv} \cdot \frac{X_{\mu 0}}{X_{21\sigma} + X_{\mu 0}} \quad (1.36)$$

Průběhy $I_{21}(s')$ a $I_{\mu}(s')$ jsou na obr.11.

Elektromagnetický moment se určí ze základní rovnice $M = 3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} / \omega_s$ s užitím vztahů (1.33) a (1.30).

$$M_i = \frac{3 \cdot \sqrt{(I_{ekv}^2 - I_{\mu}^2) \cdot [I_{\mu}^2 \cdot (X_{21\sigma} + X_{\mu})^2 + I_{ekv}^2 \cdot X_{21\sigma}^2]}}{\omega_s \cdot (1 + 2 \cdot \frac{X_{21\sigma}}{X_{\mu}})} \quad (1.37)$$

Z rovnice plyne, že moment je při zadaném I_{ekv} dán proudem I_{μ} . Při stejném I_{μ} a M je poměrná rychlost úměrná odporu obvodu rotoru. Závislost $M(I_{\mu})$ má maximum, neboť pro $I_{\mu} = I_{ekv}$ při $s' = 0$ a pro $I_{\mu} = I_{\mu 1}$ při $s' \rightarrow \infty$ jde moment k nule.[2]



Obr.1.9 Rychlostní charakteristika brzdění stejnosměrným proudem

Je-li možno zanedbat syčení magnetického obvodu a brát $X_{\mu} = k$, tj. při $I_{ekv} / I_0 \leq 0,4 - 0,5$, získá se Klossův vztah pro brzdění

$$M_{Br} = \frac{2 \cdot M_{Brm}}{\frac{s'_m}{s_m} + \frac{s'_m}{s}} \quad (1.38)$$

V rovnici je kritický moment při brzdění stejnosměrným proudem

$$M_{Brm} = \frac{3 \cdot (X_{\mu 0} \cdot I_{ekv})^2}{2 \cdot \omega_s \cdot (X_{21\sigma} + X_{\mu 0})} = f(I_{ekv}) \quad (1.39)$$

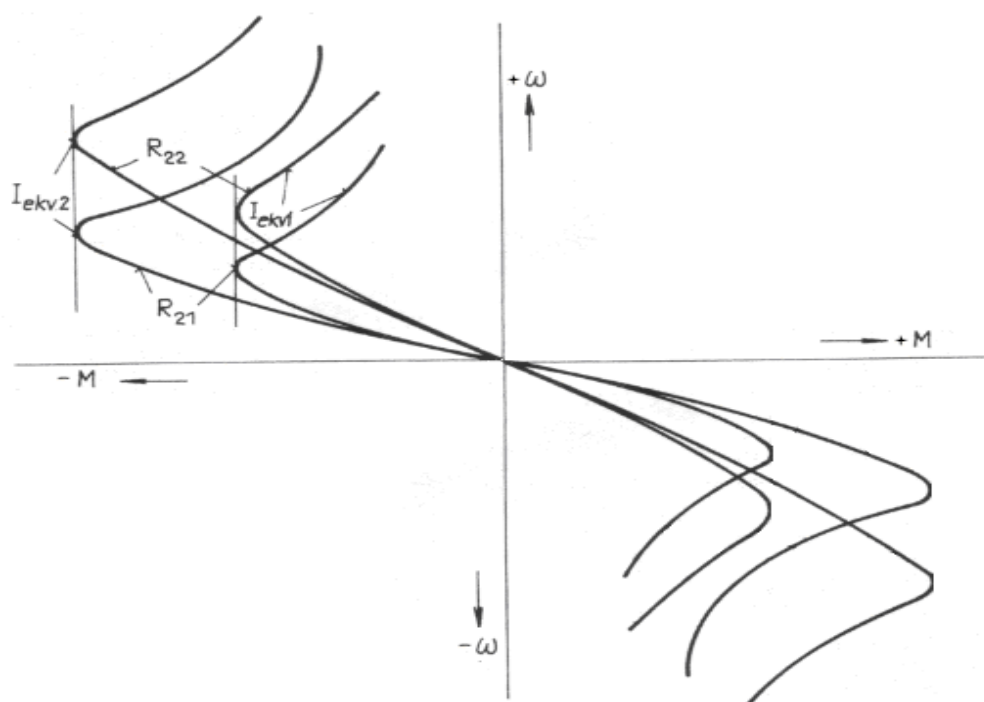
a kritická poměrná rychlost

$$s'_m = \frac{R_{21}}{X_{21\sigma} + X_{\mu 0}} = f(R_{21}) \quad (1.40)$$

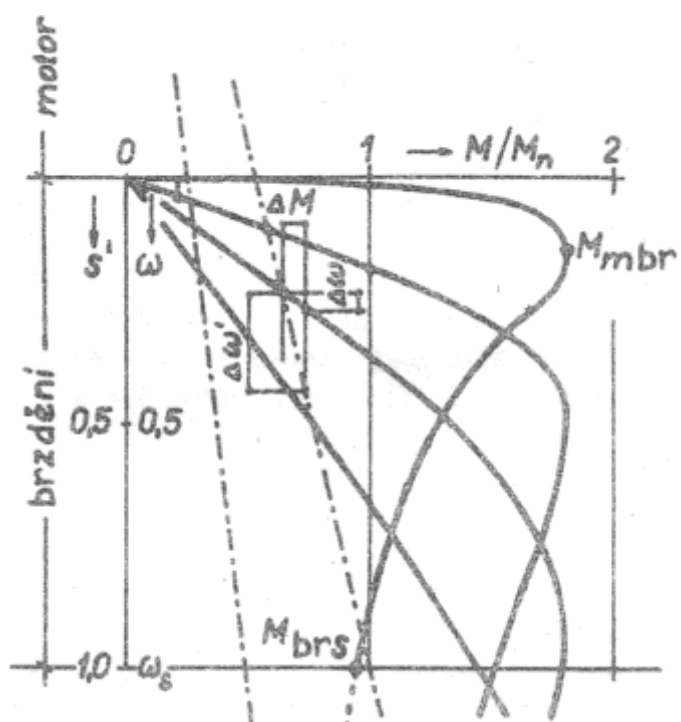
Poněvadž je $X_{\mu 0} \gg X_K$, je kritická poměrná rychlost $s'_m \ll s_m$ a $M_{Brm} < M_m$. Proto se bere $I_{ekv} \in (2 - 4) \cdot I_0$.

V obr.1.10 jsou vyneseny momentové charakteristiky stejnosměrného brzdění, moment zvratu zachovává svoji hodnotu i při zařazeném odporu R_s do obvodu rotorového vinutí. Pro seřizování asynchronního motoru brzděného stejnosměrným proudem je třeba znát závislost největšího brzdícího momentu M_{Brm} na I_{SS} se zřetelem na nebezpečí proběhnutí stroje, přestoupí-li hnací moment M_z brzdící moment M_{Brm} . Velikost brzdícího momentu závisí na rychlosti motoru, odporu spouštěče R_s a budicím proudu I_{SS} . [2]

Pro srovnání jsou v obr.1.11 zakresleny čerchovaně 2 momentové charakteristiky protisměrného brzdění. Z obojích průběhů je na první pohled zřejmé, že při malé rychlosti (např. při pomalém spouštění břemene na jeřábu) má motor málo rozdílnou rychlost při malém i velkém zatížení (břemenu), je-li dynamicky brzděn, kdežto při protisměrném brzdění se musí udržovat rychlost různým stupněm R_s . Dynamické brzdění je tedy velmi vhodné na zvedacím pohonu jeřábu, kterým se těžké strojní kusy spouštějí při montáži velmi malou rychlostí. [9]



Obr. 1.10 Mechanické charakteristiky při brzdění stejnosměrným proudem

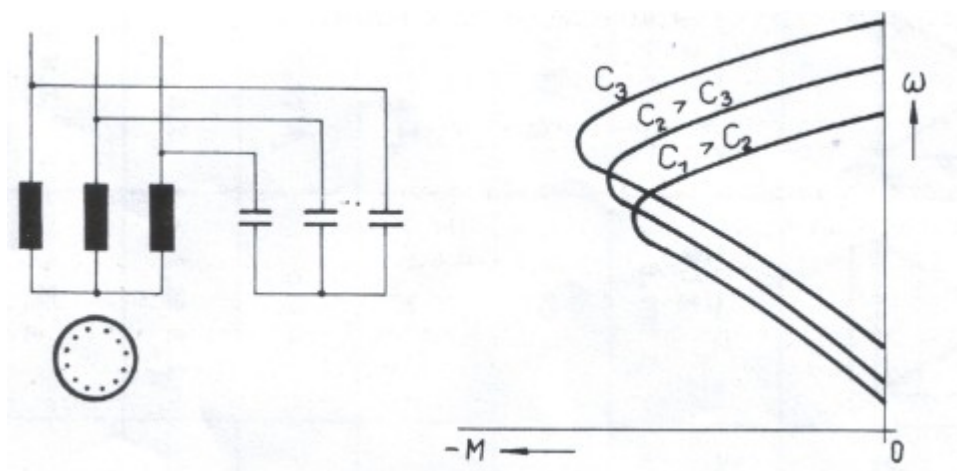


Obr.1.11 Momentové charakteristiky pro porovnání stejnosměrného a protiproudového brzdění

Je to vedle protiproudového brzdění často užívaný a účinný způsob brzdění. K výhodám patří příznivá energetická bilance při brzdění, možnost řízení budicího proudu, a tedy momentu a okolnost, že při zabrzdění do klidu je nulový brzdňý moment.[2]

Určitou nevýhodou je nutnost zvláštního zdroje stejnosměrného proudu, nerovnoměrné oteplování jednotlivých fází motoru při nesouměrném napájení vinutí statoru a malý brzdňý moment při velmi nízkých rychlostech i při vysokých rychlostech (u motorů nakrátko).[2]

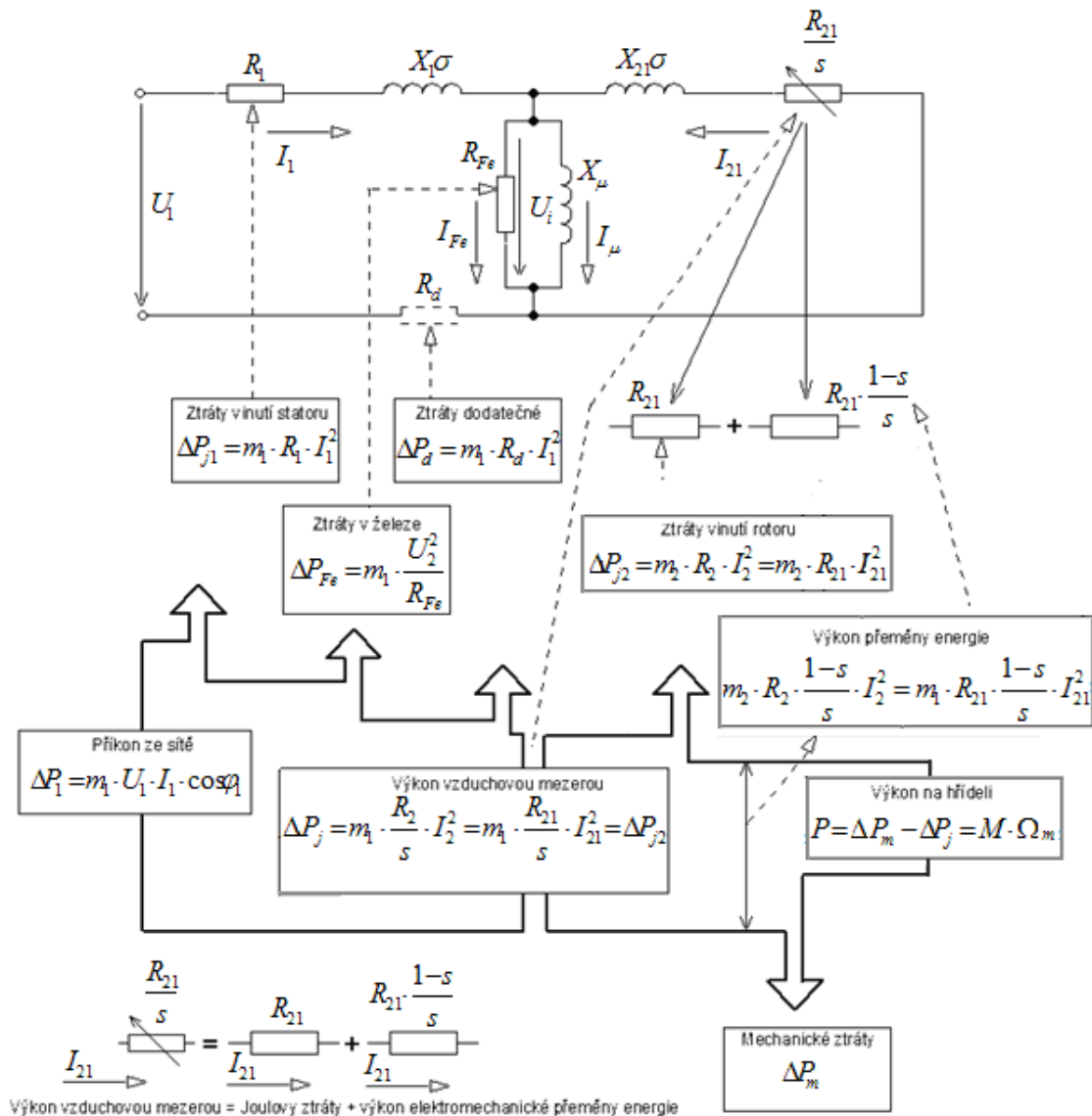
Nevýhoda potřeby zvláštního zdroje odpadá u brzdění asynchronních motorů stejnosměrným proudem s vlastním buzením, které je zobrazeno na obr.1.12.[2]



Obr.1.12 Brzdění asynchronních motorů s vlastním buzením

3. Měření asynchronního elektromotoru pro stanovení prvků náhradního schématu

Pro rozbor práce asynchronního stroje mají velký význam náhradní schémata, která umožňují názorně stanovit a vysvětlit závislosti mezi veličinami, charakterizujícími jednotlivé stavy tohoto stroje. Je to určité spojení odporů a reaktancí volené tak, aby toto schéma mělo určité vlastnosti společné se skutečným strojem.



Obr. 2.1 Náhradní schéma a rozdělení výkonů asynchronního motoru

Aby bylo možné stanovit jednotlivé parametry náhradního schématu je nutné znát:

1) Šítkové údaje asynchronního motoru

Asynchronní motor	
Výkon	P=2 kW
Stator	Y 380V 7,4A
Rotor	Y 90V 15,5A
Otáčky	n=905 ot./min
Hmotnost	m=65kg
Frekvence	50 Hz
Krytí	IP44
Výrobce	MEZ Frenštát
Typ	112M06
Třída	F

Tab. 2.1 Šítkové hodnoty

2) Odpory vinutí

U asynchronních motorů měříme voltampérovou metodou pro malé odpory vinutí jednotlivých fází statoru a jestliže má stroj kroužkovou kotvu, měříme i vinutí kotvy. Při měření vinutí kotvy překontrolujeme polohu odklápeče kartáčů (poloha běh), odpojíme vodiče od spouštěcího odporu a pro vyloučení přechodových odporů kartáčů měříme napětí (pomocí hrotů) přímo na kroužcích.[9]

1. Odpory vinutí před spuštěním stroje

$$U - V = 4,84\Omega$$

$$U - W = 4,83\Omega$$

$$V - W = 4,84\Omega$$

2. Odpor vinutí stroje po zahřátí při chodu naprázdno

$$U - V = 5,05\Omega$$

$$U - W = 5,04\Omega$$

$$V - W = 5,04\Omega$$

3. Odpor vinutí stroje po zahřátí při chodu nakrátko

$$U - V = 5,38\Omega$$

$$U - W = 5,37\Omega$$

$$V - W = 5,36\Omega$$

3) Zkoušku naprázdno a nakrátko asynchronního motoru

Při měření naprázdno zjišťujeme:

- a) charakteristiku naprázdno $I_{10} = f(U_{10})$
- b) závislost ztrát naprázdno $\Delta P_{10} = f(U_{10})$
- c) z naměřených závislostí charakteristické hodnoty např. dílčí ztráty v chodu naprázdno pro sestrojení kruhového diagramu

Z naměřených hodnot naprázdno vyneseme požadované grafické závislosti ze kterých vyčteme požadované parametry nezbytné pro stanovení prvků vyskytujících se v náhradním schématu asynchronního motoru.[9]

Z měření naprázdno při $U_0 = U_{1n} = 220V$ byli stanoveny následující parametry:

$$I_{10n} = 6A$$

$$\Delta P_{0n} = 560W$$

$$\Delta P_m = 45W$$

$$R_{10f} = 2,52\Omega$$

$$R_1 = R_{10f} = 2,52\Omega$$

Při měření nakrátko ztišťujeme:

- a) charakteristiku nakrátko $I_{1k} = f(U_{1k})$
- b) závislost ztrát nakrátko $\Delta P_{1k} = f(U_{1k})$
- c) z průběhů závislostí a dalších změřených údajů některé charakteristické údaje např. záběrný moment, dílčí ztráty nakrátko a údaje pro kruhový diagram

Z naměřených hodnot nakrátko vyneseme požadované grafické závislosti ze kterých vyčteme požadované parametry nezbytné pro stanovení prvků vyskytujících se v náhradním schématu asynchronního motoru.[9]

Z měření nakrátko při $I_k = I_{1n} = 7,4A$ byli stanoveny následující parametry

$$U_{1kn} = 68,3V$$

$$\Delta P_{1kn} = 1045W$$

$$R_{1kf} = 2,685\Omega$$

$$U_{k0} = 3,25V$$

Hodnoty, které jsme odečetli ze štítku motoru a z grafických závislostí při měření naprázdno a nakrátko lze dosadit do vztahů charakterizující jednotlivé parametry v náhradním schématu asynchronního motoru.[9]

Pro odpor rotorového vinutí přepočítaný na stator platí vztah:

$$R_{21} = \frac{\Delta P_{1kn}}{3 \cdot I_k^2} - R_{1kf} = \frac{1045}{3 \cdot 7,4^2} - 2,685 = 3,68\Omega$$

Odpor nakrátko

$$R_k = R_{1kf} + R_{21} = 2,685 + 3,68 = 6,37\Omega$$

Impedance nakrátko

$$Z_k = \frac{U_{1kn}}{I_{1n}} = \frac{68,3}{7,4} = 9,23\Omega$$

Reaktance nakrátko

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{9,23^2 - 6,37^2} = 6,68\Omega$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí

$$X_1\sigma = \frac{X_k}{2} = \frac{6,68}{2} = 3,34\Omega$$

Rozptylová reaktance rotorového vinutí přepočítaná na stator

$$X_{21}\sigma = X_1\sigma = 3,34\Omega$$

Ztráty v mědi statoru vypočítané z měření naprázdno

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_{10f} \cdot I_{10n}^2 = 3 \cdot 2,52 \cdot 6^2 = 272,16W$$

Ztráty v železe vypočítané z měření naprázdno

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{0n} - \Delta P_{j10} - \Delta P_m = 560 - 272,16 - 45 = 242,84W$$

Odpor v železe

$$R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_{1n}^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{3 \cdot 220^2}{242,84} = 597,93\Omega$$

Účinník při chodu naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_{0n}}{3 \cdot U_{1n} \cdot I_{10n}} = \frac{560}{3 \cdot 220 \cdot 6} = 0,141$$

$$\sin \varphi_0 = 0,99$$

Impedance na svorkách statoru

$$Z_{11} = \frac{U_{1n}}{I_{10n}} = \frac{220}{6} = 36,67\Omega$$

Reaktance na svorkách statoru

$$X_{11} = Z_{11} \cdot \sin \varphi_0 = 36,67 \cdot 0,99 = 36,3\Omega$$

Magnetizační reaktance

$$X_{\mu} = X_{11} - X_1 \sigma = 36,3 - 3,34 = 32,96 \Omega$$

Ztráty v mědi statoru vypočtené z měření nakrátko

$$\Delta P_{j1k} = 3 \cdot R_{1kf} \cdot I_{1n}^2 = 3 \cdot 2,685 \cdot 7,4^2 = 441,09 W$$

Ztráty v mědi rotoru vypočtené z měření nakrátko

$$\Delta P_{j2k} = \Delta P_{1kn} - \Delta P_{j1k} - \Delta P_{Fe} = 1045 - 441,09 - 242,84 = 361,07 W$$

Proud nakrátko při jmenovitém napětí

$$I_{1kn} = I_{1n} \cdot \frac{U_{1n} - U_{k0}}{U_{1kn} - U_{k0}} = 7,4 \cdot \frac{220 - 3,25}{68,3 - 3,25} = 24,66 A$$

Účinit nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{\Delta P_{1kn}}{3 \cdot U_{1kn} \cdot I_{1n}} = \frac{1045}{3 \cdot 68,3 \cdot 7,4} = 0,69$$

Proud rotoru přepočítaný na stator

$$I_{21} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_{21}}{s})^2 + (X_1 \sigma + X_{21} \sigma)^2}} = \frac{220}{\sqrt{(2,52 + \frac{3,68}{0,095})^2 + (3,34 + 3,34)^2}} = 5,3 A$$

Mechanická rychlost

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} = \frac{2000 \cdot \pi}{60} = 104,7 rad / s$$

Vnitřní (elektromagnetický) moment

$$M_i = \frac{m \cdot R_{21} \cdot I_{21}^2}{\Omega \cdot s} = \frac{3 \cdot 3,68 \cdot 5,3^2}{104,7 \cdot 0,095} = 30,8 N \cdot m$$

4. Měření asynchronního elektromotoru pro dvě brzdná zapojení

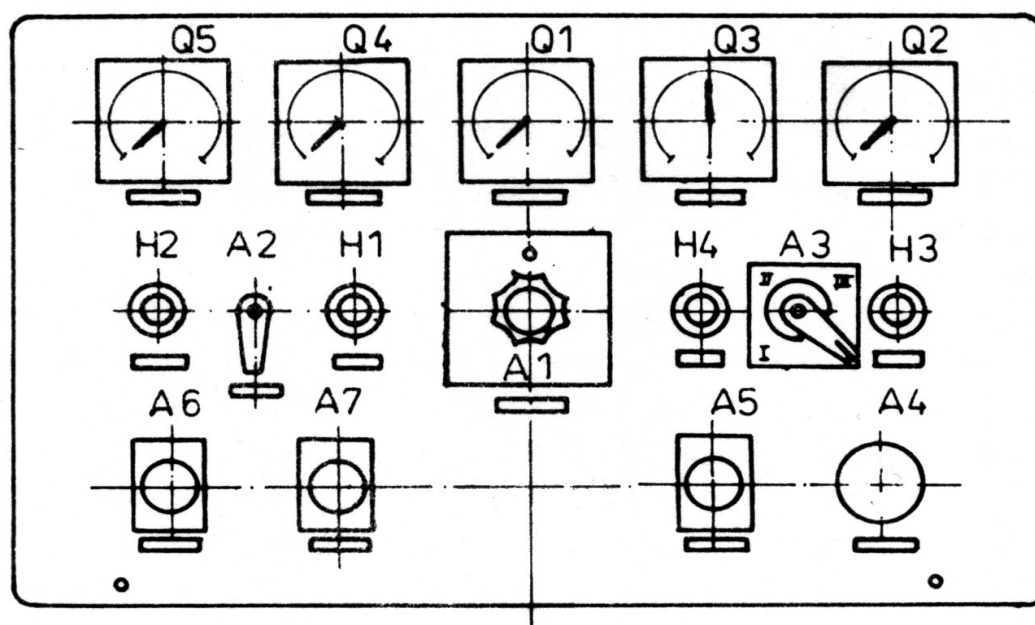
Na asynchronním motoru s kotvou kroužkovou, který má do obvodu rotoru připojený spouštěcí odpor $R_s = 5\Omega$ o jmenovitých parametrech: $P_n = 2kW$, $z = 40\%$, $n_n = 905ot./min$ je zapojen do hvězdy, $n_s = 1000ot./min$, $U_{1n} = 220V$, $I_{1n} = 7,4A$. Rotor: $U_{20} = 90V$, $I_{2n} = 15,5A$ provedeme měření pro dvě různé spojení statorového vinutí, kterým stanovíme vlastnosti při brzdění asynchronního motoru stejnosměrným proudem. Pro napájení měřeného motoru střídavým i stejnosměrným proudem a pro jeho ovládání bude použit ovládací pult. Ovládací obvod je nutno zapojit tak, aby bylo provedeno vzájemné blokování stykačů proti jejich současnému zapnutí a můžeme přistoupit k samotnému měření. Před připojením měřeného motoru na napětí nejprve uvedeme do chodu dynamometr a provedeme následující:[1]

1. Zapneme hlavní jistič V1 (na boční straně pultu) a voltmetrem Q1 překontrolujeme jednotlivá napětí – fázová i sdružená.
2. Zapneme spínač A2 (ovládací obvody). Rozsvítí se signálka svítidla „ovládání zapnuto“ a „ventilátor“. Současně se uvede do chodu ventilátor.
3. Na ovládacím pultu provedeme pomocí přepínače A3 volbu pracovního režimu (v našem případě „pohon“ a směr otáčení dynamometru (buď ve směru nebo proti směru šipky). Volbu pracovního režimu je nutno provést zásadně před startem dynamometru. Za chodu nelze v žádném případě zvolený režim měnit!
4. Tlačítkem A5 (start) uvedeme dynamometr do chodu.
5. Tlačítkem A6 (nižší otáčky) nastavíme otáčky dynamometru přibližně na nulu (nulovým otáčkám odpovídá při brzdění nulový brzdící moment).

U stejnosměrného brzdění nejprve nastavíme co možná nejmenší napětí (regulační transformátor s výstupem 3 x 0 – 400 V zapojeným na vstup usměrňovače U1) tlačítkem SB7. Otočným ovladačem SA3 sepne stykač KM3 pro připojení výstupu usměrňovače U1 ke statoru měřeného motoru. Dále sepne tlačítko SB5 pro připojení střídavého napětí 0 – 400 V na vstup usměrňovače U1. Tlačítkem SB7 resp. SB8 nastavíme změnu velikosti střídavého napětí sekundárního vinutí regulačního transformátoru podle ampérmetru požadovanou hodnotu brzdícího stejnosměrného proudu měřeného motoru. Při měření odečteme hodnotu napětí U_{ss} . Další vypínání resp. zapínání stejnosměrného obvodu provádíme dále tlačítkem SB6, resp. SB5 na střídavé straně usměrňovače U1. Pozor: Pro rozpínání brzdného stejnosměrného proudu nepoužívat stykač KM3. Je to střídavý stykač, došlo by k jeho zničení.

Samotné měření momentových charakteristik provádíme tak, že nejprve uvolníme aretaci sklopné váhy, tlačítkem A7 (vyšší otáčky) zvyšujeme otáčky otáčkoměru a odečítáme příslušné hodnoty momentu na stupnici váhy. Po doměření jedné charakteristiky tlačítkem A6 snížíme otáčky zpět na nulu, zvolíme jiný způsob, resp. jinou hodnotu R_s přepínačem SA1 (ovládání stykačů v odporové skřini) nebo jinou velikost brzdícího proudu nastavením vstupního střídavého napětí na vstupu usměrňovače U1 a měření opakujeme. Po odměření všech charakteristik opět snížíme otáčky na nulu, vypneme měřený stroj, zaaretujeme váhu a tlačítkem A4 (zastavení) vypneme pohon dynamometru. Nakonec spínačem A2 vypneme ovládání a ventilátor. Vypnutím hlavního jističe se odpojí celé zařízení od sítě.

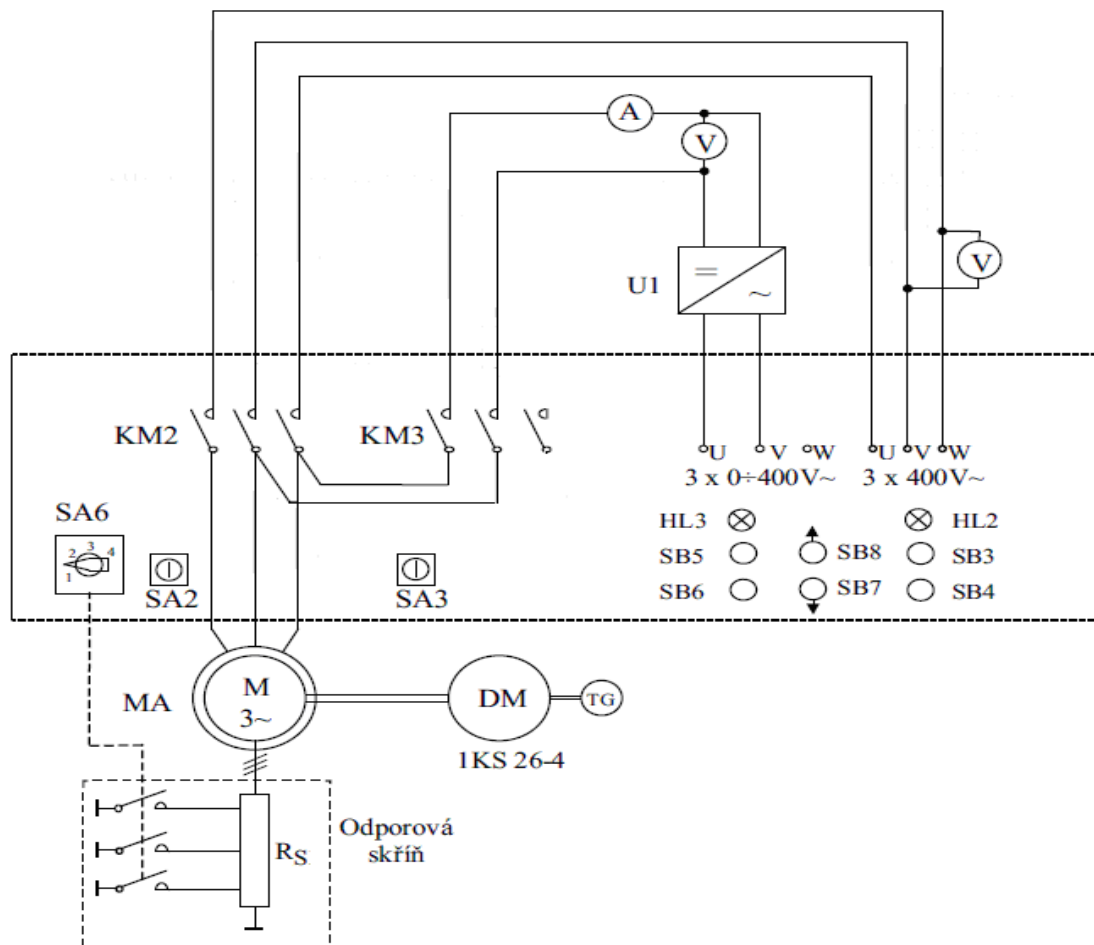
Měřený motor je mechanicky spojen s hřídelí dynamometru, pomocí kterého zatěžujeme resp. při brzdění poháníme měřený stroj a na němž odečítáme velikost mechanického momentu a otáček. Ovládání dynamometru se provádí pomocí prvků umístěných na ovládacím panelu viz obr. 3.2.[1]



Obr. 3.1 Ovládací panel dynamometru

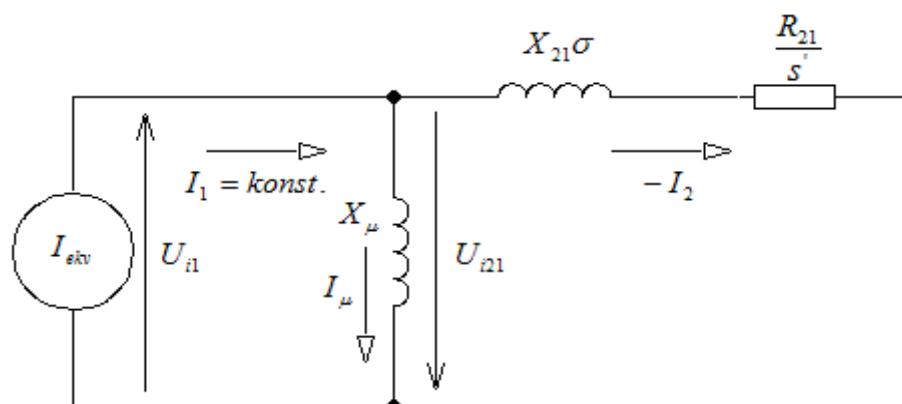
Q1- napětí sítě ; A1-přepínač síťových napětí ; Q2-celkový proud ; Q3-celkový příkon ; Q4-proud v rotoru ; Q5-otáčky ; A2-spínač ovládacího napětí+ventilátor ; H1-signálka-ovládání zapnuto ; H2-signálka-ventilátor sepnut ; A3-volba pracovního režimu (I-brzda proti směru šipky-svíí H4,II-pohon proti směru šipky-svíí H4,III-pohon po směru šipky-svíí H3,IV-brzda po směru šipky-svíí H3) ; A4-zastavení ; A5-start ; A6-nižší otáčky ; A7-vyšší otáčky

První brzdné zapojení



Obr.3.2 Schéma zapojení při brzdění stejnosměrným proudem

Na obr.3.2 je schéma zapojení laboratorní úlohy pro první způsob zapojení statoru. Při brzdění asynchronního motoru stejnosměrným proudem platí náhradní schéma uvedené v obr.3.2.

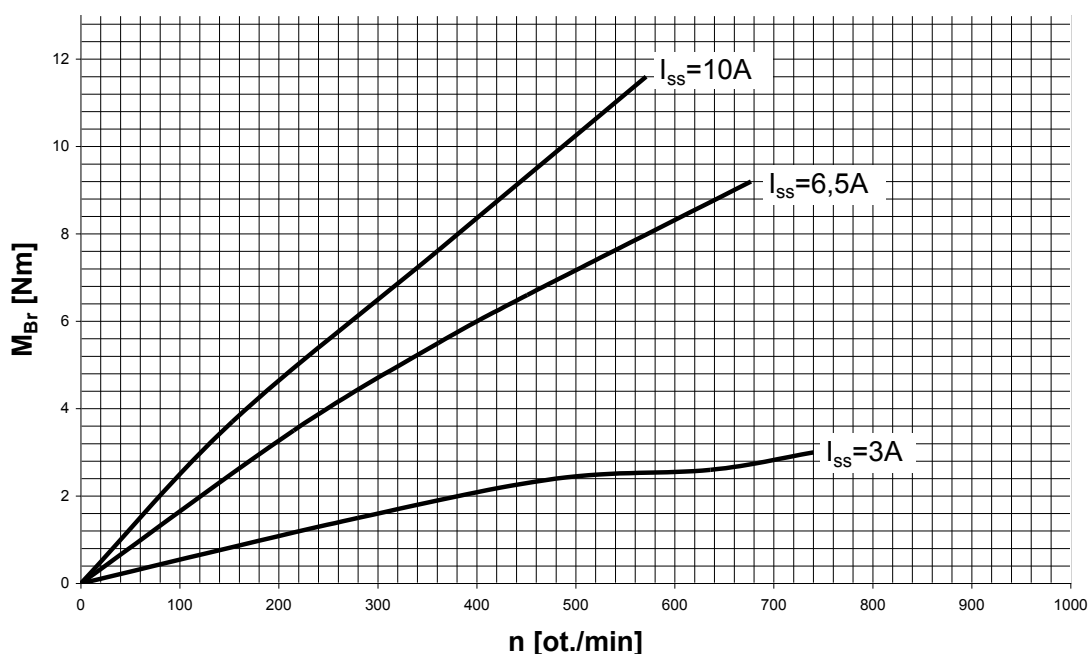


Obr.3.3 Náhradní schéma pro brzdění stejnosměrným proudem

Pro daný stejnosměrný proud a napětí byly změřeny pomocí dynamometru brzdné momenty pro různé otáčky motoru, které byly odečítány z otáčkoměru, tak jak je uvedeno v tab. 3.1. Naměřené hodnoty jsou zpracovány graficky a vyobrazeny v obr. 3.3.

I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
3	15	0	0
3	15	1,5	280
3	15	2,4	480
3	15	2,6	636
3	15	3	740
I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
6,5	33,5	0	0
6,5	33,5	3,5	215
6,5	33,5	5,5	361
6,5	33,5	6,6	451
6,5	33,5	9,2	677
I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
10	54	0	0
10	54	3,7	153
10	54	7,6	360
10	54	11,6	571

Tab. 3.1 Tabulka naměřených hodnot při brzdění stejnosměrným proudem

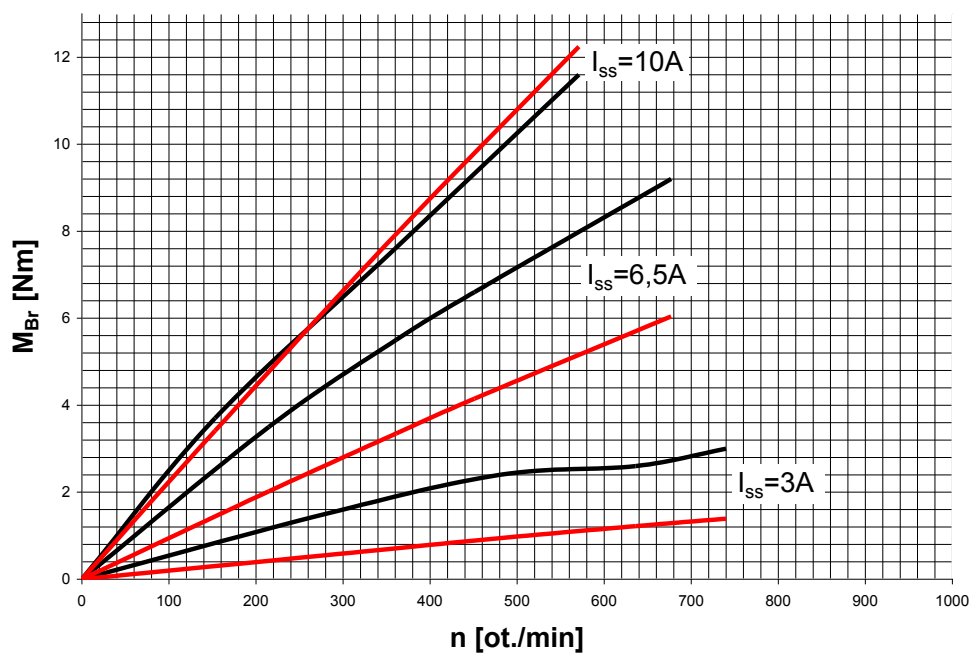


Obr.3.4 Naměřené momentové charakteristiky při brzdění stejnosměrným proudem

Naměřené hodnoty uvedené v tab. 3.1 byly ověřeny výpočtem a zapsány do tab. 3.2. Naměřené a vypočtené brzdné momenty jsou pro srovnání vyneseny graficky v obr. 3.5.

I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
3	15	0	0
3	15	0,55	280
3	15	0,94	480
3	15	1,22	636
3	15	1,39	740
I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
6,5	33,5	0	0
6,5	33,5	2,02	215
6,5	33,5	3,35	361
6,5	33,5	4,15	451
6,5	33,5	6,04	677
I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
10	54	0	0
10	54	3,41	153
10	54	7,91	360
10	54	12,24	571

Tab. 3.2 Tabulka vypočtených hodnot



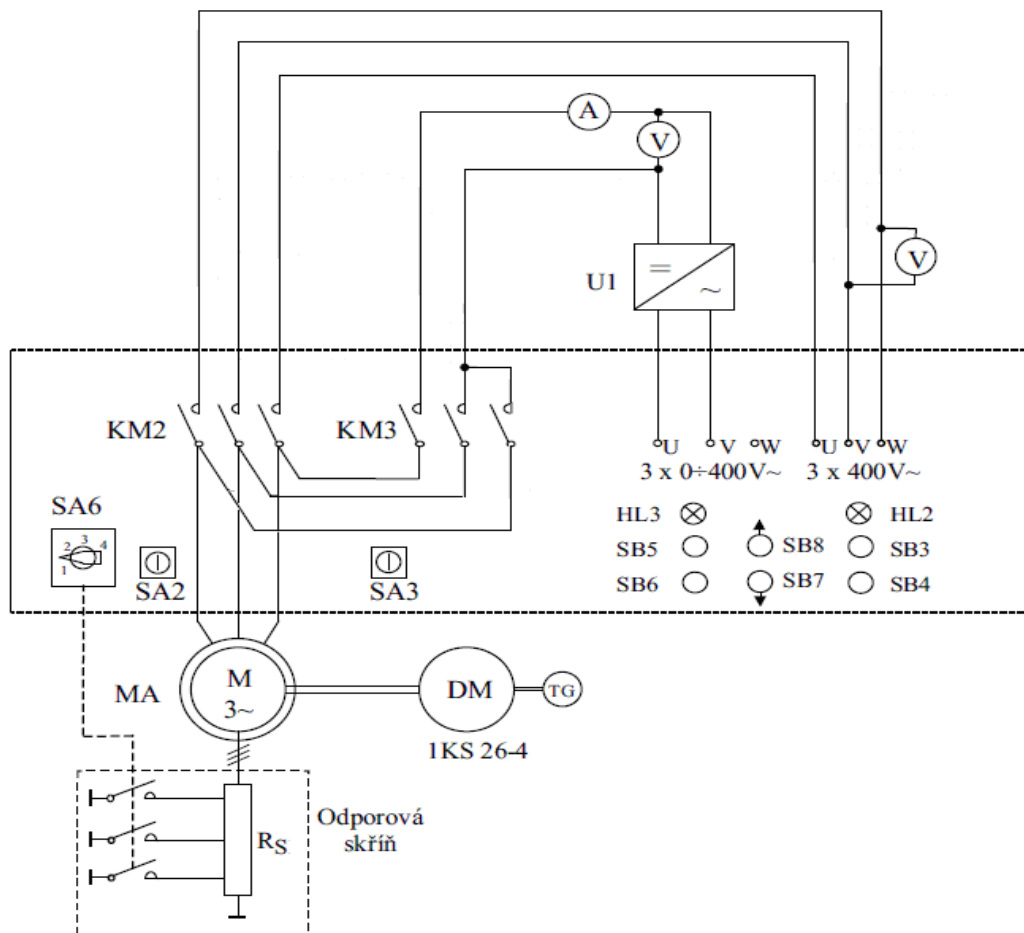
Obr. 3.5 Momentové charakteristiky naměřených a vypočtených hodnot

Pomocí programu Matlab byl proveden podle teoretických předpokladů výpočet jednotlivých vztahů potřebných k určení brzdných momentů. Příklad výpočtu brzdného momentu pro druhý řádek v tab. 3.2 a maximálního brzdného momentu pro stejnosměrný budící proud 3A je uveden níže. Pro výpočet jsou použity hodnoty, které jsou získány z výpočtu náhradního schématu asynchronního motoru. Při výpočtu nesmíme zapomenout na připojený spouštěcí odpor do obvodu kotvy, který je třeba převodem přepočíst a přičíst k hodnotě odporu rotorového vinutí kotvy přepočteného z měření pro stanovení prvků náhradního schématu bez zařazeného spouštěcího odporu do obvodu kotvy.[4]

```
f=50; % Hz
Xmi=32.96; % Ohm
Iss=3; % A
n=280; % ot/min
p=3; % -
m=3; % -
ns=1000/60; % ot/min
Rs=5; % Ohm
R21=3.68; % Ohm
%-----

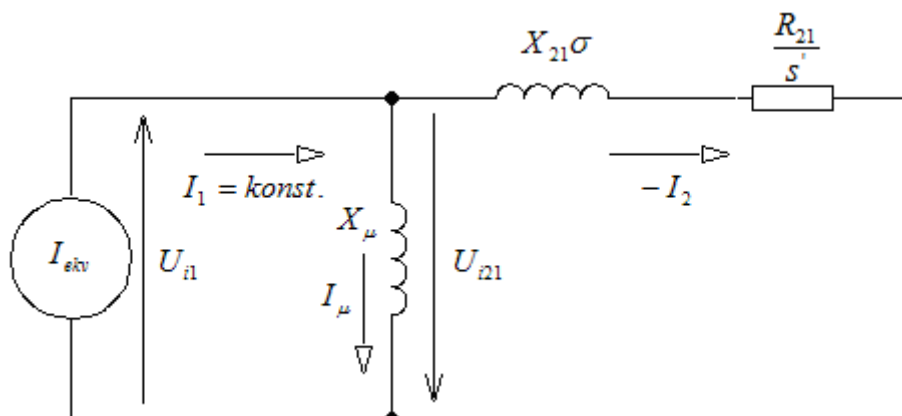
%Odpor rotoru přepočtený na stator
R21=R21+Rs*(380/90)^2
R21=92.82 % Ohm
%Synchronní rychlost
Ws=2*pi*f/p
Ws=104.7198 rad/s
%Asynchronní rychlost
W=2*pi*n/60
W=29.3215 rad/s
%Poměrná rychlost
s'=W/Ws
s'=0.2800 -
%Ekvivalentní střídavý proud
Iekv=Iss/1.23
Iekv=2.4390 A
%Magnetyzační proud
Imi=R21/(Xmi*s')
Imi=10.0576 A
%Proud rotoru přepočtený na stator
I21=sqrt((Iekv^2)/(1+Imi^2))
I21=0.2413A
%Brzdný moment
Mbr=(3*R21*I21^2)/(W0*s')
Mbr=0.5530 Nm
%Maximální brzdný moment
MBrm=(m/(4*pi*ns))*Xmi*Iekv^2
Mbrm=2.8085 Nm
```

Druhé brzdné zapojení



Obr.3.6 Schéma zapojení při brzdění stejnosměrným proudem

Na obr.3.6 je schéma zapojení laboratorní úlohy pro první způsob zapojení statoru. Při brzdění asynchronního motoru stejnosměrným proudem platí náhradní schéma uvedené v obr.3.7.

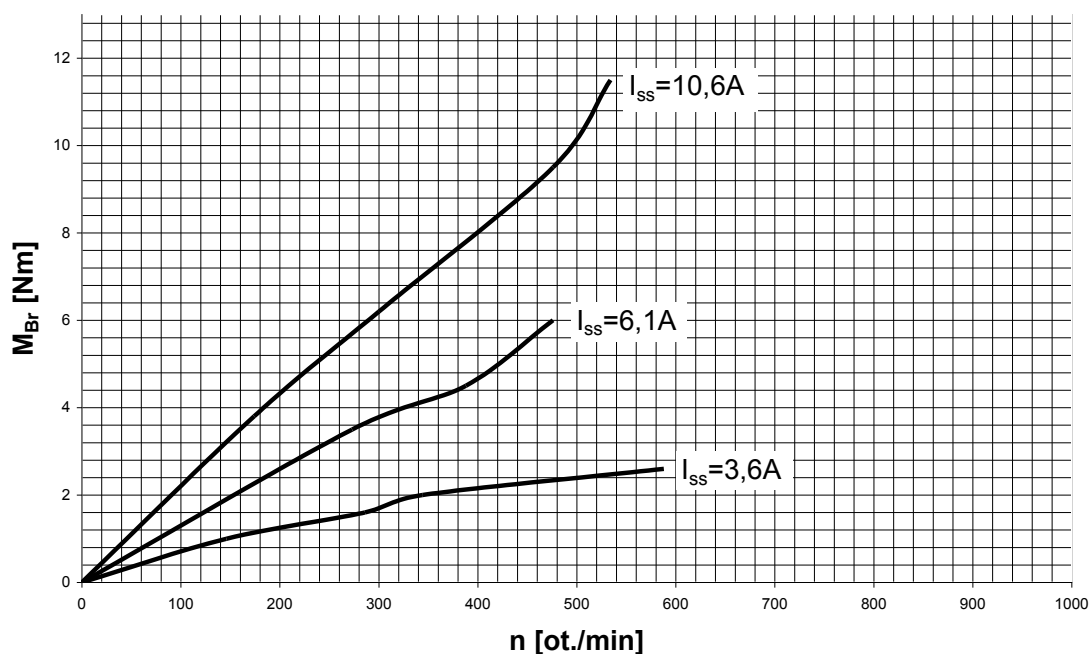


Obr.3.7 Náhradní schéma pro brzdění stejnosměrným proudem

Pro daný stejnosměrný proud a napětí byly změřeny pomocí dynamometru brzdné momenty pro různé otáčky motoru, které byly odečítány z otáčkoměru, tak jak je uvedeno v tab. 3.3. Naměřené hodnoty jsou zpracovány graficky a vyobrazeny v obr. 3.8.

I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
6,1	24	0	0
6,1	24	3,5	273
6,1	24	4,5	388
6,1	24	6	476
10,6	42	0	0
10,6	42	3,8	174
10,6	42	6,2	300
10,6	42	9,5	476
10,6	42	11,5	534
3,6	14	0	0
3,6	14	1,6	286
3,6	14	2,6	588
3,6	14	2	344
3,6	14	1	146

Tab. 3.3 Tabulka naměřených hodnot při brzdění stejnosměrným proudem

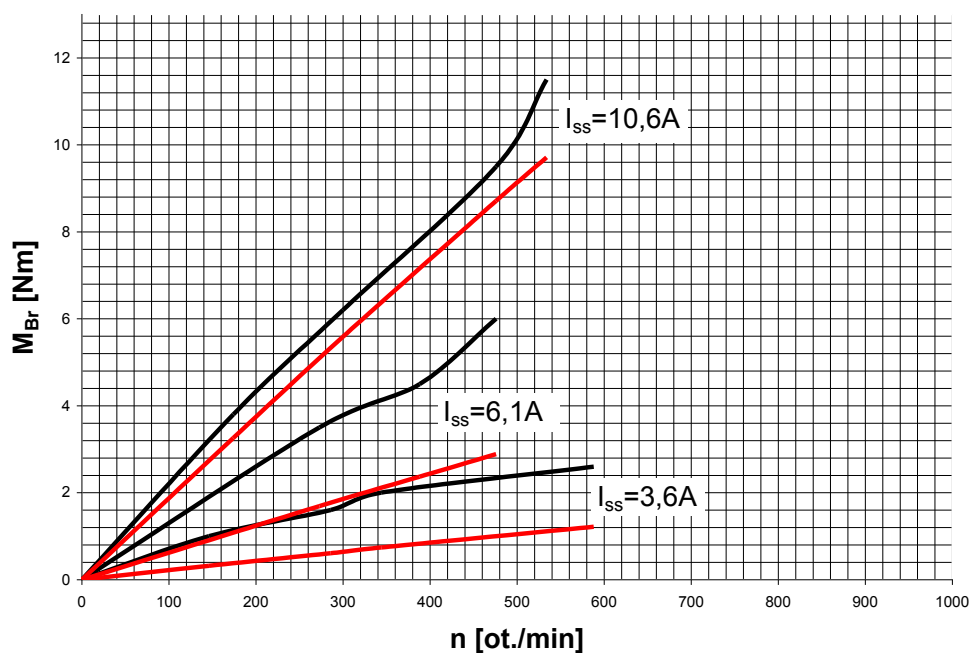


Obr.3.8 Naměřené momentové charakteristiky při brzdění stejnosměrným proudem

Naměřené hodnoty uvedené v tab. 3.3 byly ověřeny výpočtem a zapsány do tab. 3.4. Naměřené a vypočtené brzdné momenty jsou pro srovnání vyneseny graficky v obr. 3.9.

I_{ss} [V]	U_{ss} [V]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
6,1	24	0	0
6,1	24	1,69	273
6,1	24	2,37	388
6,1	24	2,89	476
10,6	42	0	0
10,6	42	3,26	174
10,6	42	5,59	300
10,6	42	8,71	476
10,6	42	9,71	534
3,6	14	0	0
3,6	14	0,32	146
3,6	14	0,61	286
3,6	14	0,74	344
3,6	14	1,22	588

Tab. 3.4 Tabulka vypočtených hodnot



Obr. 3.9 Momentové charakteristiky naměřených a vypočtených hodnot

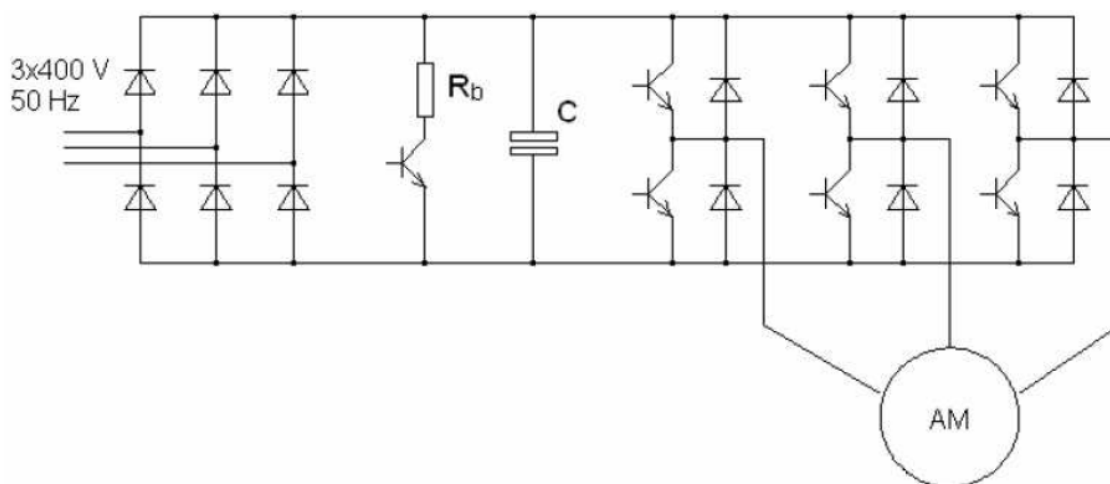
Pomocí programu Matlab byl proveden podle teoretických předpokladů výpočet jednotlivých vztahů potřebných k určení brzdných momentů. Příklad výpočtu brzdného momentu pro druhý řádek v tab. 3.4 a maximálního brzdného momentu pro stejnosměrný budící proud 6,1A je uveden níže. Pro výpočet jsou použity hodnoty, které jsou získány z výpočtu náhradního schématu asynchronního motoru. Při výpočtu nesmíme zapomenout na připojený spouštěcí odpor do obvodu kotvy, který je třeba převodem přepočíst a přičíst k hodnotě odporu rotorového vinutí kotvy přepočteného z měření pro stanovení prvků náhradního schématu bez zařazeného spouštěcího odporu do obvodu kotvy.[4]

```
f=50; % Hz
Xmi=32.96; % Ohm
Iss=6.1; % A
n=273; % ot/min
p=3; % -
m=3; % -
ns=1000/60; % ot/min
Rs=5; % Ohm
R21=3.68; % Ohm
%-----

%Odpor rotoru přepočtený na stator
R211=R21+Rs*(380/90)^2
R21=92.82 % Ohm
%Synchronní rychlost
Ws=2*pi*f/p
Ws=104.7198rad/s
%Asynchronní rychlost
W=2*pi*n/60
W=28.5885 rad/s
%Poměrná rychlost
s'=W/Ws
S'=0.2730 -
%Ekvivalentní střídavý proud
Iekv=Iss*0.707
Iekv=4.3127 A
%Magnetyzační proud
Imi=R21/(Xmi*s)
Imi=10.3155 A
%Proud rotoru přepočtený na stator
I21=sqrt((Iekv^2)/(1+Imi^2))
I21=0.4161 A
%Brzdný moment
Mbr=(3*R21*I21^2)/(W0*s)
Mbr=1.6866 Nm
%Maximální brzdný moment
MBrm=(m/(4*pi*ns))*Xmi*Iekv^2
Mbr=8.7811 Nm
```

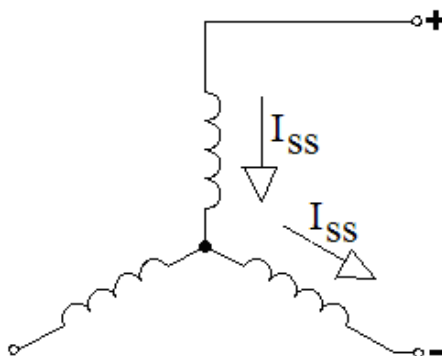
Brzdění stejnosměrným proudem pomocí frekvenčního měniče

Frekvenční měniče umožňují brzdění asynchronních motorů stejnosměrným proudem. Schéma zapojení při brzdění stejnosměrným proudem pomocí frekvenčního měniče je zobrazeno na obr.3.10. Brzdění bylo provedeno bez spouštěcího odporu R_s .



Obr.3.10 Brzdění stejnosměrným proudem přes frekvenční měnič

Zapojení satorového vinutí asynchronního motoru při brzdění stejnosměrným proudem pomocí frekvenčního měniče si lze představit, tak jak je na obr. 3.11. Frekvenční měnič se chová jako spojení pro první měření



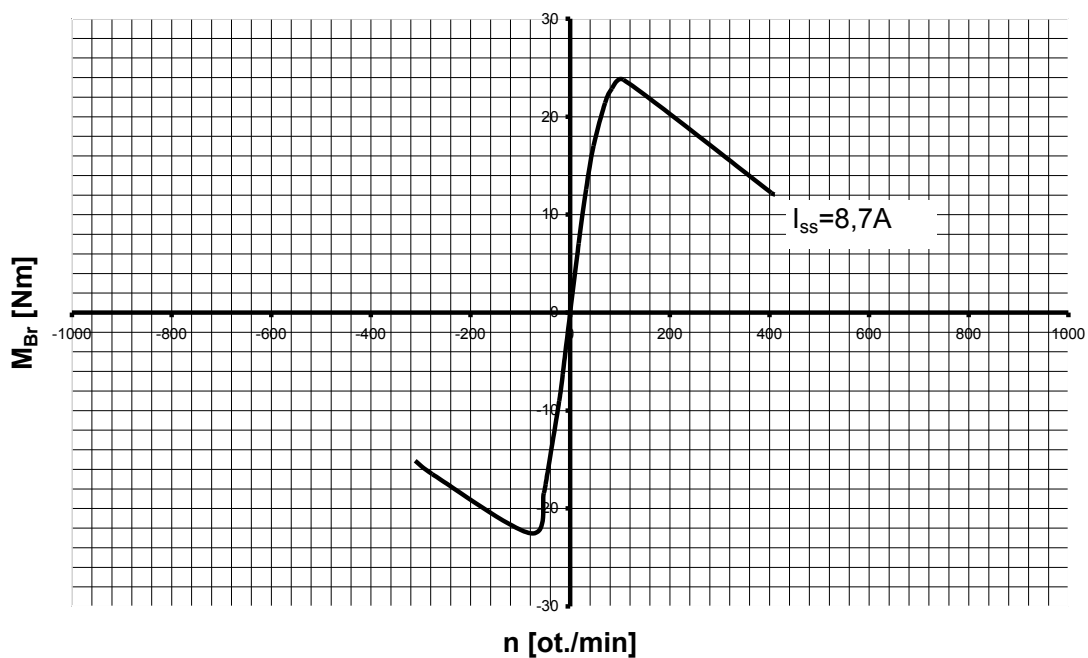
Obr.3.11 Spojení satoru při brzdění frekvenčním měničem

Připojením stejnosměrného proudu na svorky satoru přes frekvenční měnič dochází nejprve ke snížení rychlosti rotoru na základě postupně snižované frekvence, kterou tento frekvenční měnič už z názvu dokáže měnit. Až je rychlost rotoru snížena na otáčky odpovídající maximálnímu brzděmu momentu (obr.3.12), tak motor teprve začne brzdít a tento stav udržuje až do zastavení rotoru. Nad touto rychlostí rotoru motor nebrzdí.

Pro daný stejnosměrný proud a napětí byly změřeny pomocí dynamometru brzdné momenty pro oba směry otáčení motoru, tak jak je uvedeno v tab. 3.5. Naměřené hodnoty jsou zpracovány graficky a vyobrazeny v obr. 3.12.

U_{ss} [V]	I_{ss} [A]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
34	8,7	-13	-311
34	8,7	-15	-277
34	8,7	-24,5	-80
34	8,7	-20,5	-53
34	8,7	-18,3	-49
34	8,7	-8,3	-22
34	8,7	-6,2	-15
34	8,7	0	0
34	8,7	6,5	17
34	8,7	12,5	32
34	8,7	18	47
34	8,7	23	70
34	8,7	24,3	84
34	8,7	24,5	107
34	8,7	10,4	404
34	8,7	10	411

Tab.3.5 Tabulka naměřených hodnot při brzdění stejnosměrným proudem

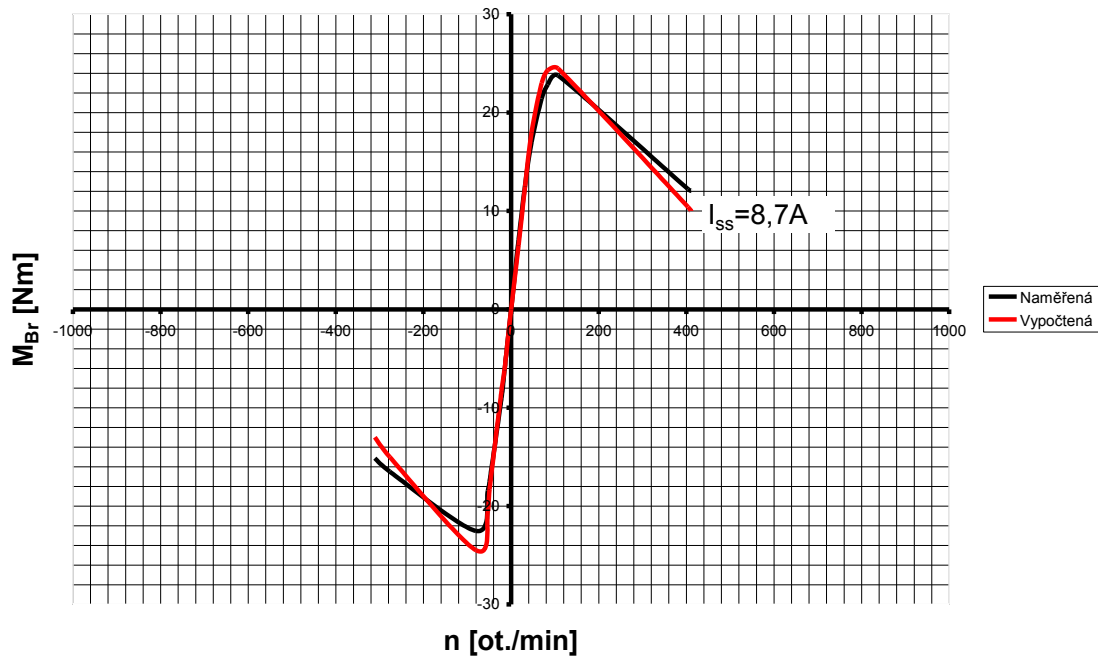


Obr.3.12 Naměřená momentová charakteristika při brzdění stejnosměrným proudem

Naměřené hodnoty uvedené v tab. 3.5 byly ověřeny výpočtem a zapsány do tab. 3.6. Naměřené a vypočtené brzdné momenty jsou pro srovnání vyneseny graficky v obr. 3.13.

U_{ss} [V]	I_{ss} [A]	M_{Br} [Nm]	n [ot/min]
34	8,7	-15,14	-311
34	8,7	-16,5	-277
34	8,7	-22,53	-80
34	8,7	-18,44	-53
34	8,7	-17,51	-49
34	8,7	-9,03	-22
34	8,7	-6,28	-15
34	8,7	0	0
34	8,7	7,08	17
34	8,7	12,6	32
34	8,7	17,02	47
34	8,7	21,42	70
34	8,7	22,86	84
34	8,7	23,77	107
34	8,7	12,22	404
34	8,7	12,04	411

Tab.3.6 Tabulka vypočtených hodnot



Obr. 3.13 Momentové charakteristiky naměřených a vypočtených hodnot

Pomocí programu Matlab byl proveden podle teoretických předpokladů výpočet jednotlivých vztahů potřebných k určení brzdných momentů. Příklad výpočtu brzdného momentu pro poslední řádek a maximálního brzdného momentu v tab. 3.6 je uveden níže. Pro výpočet jsou použity hodnoty, které jsou získány z výpočtu náhradního schématu asynchronního motoru.[4]

```
f=50; % Hz
Xmi=32.96; % Ohm
R21=3.68; % Ohm
Iss=8.7; % A
n=411; % ot/min
p=3; % -
m=3; % -
ns=1000/60; % ot/min
%-----

%Synchronní rychlost
Ws=2*pi*f/p
Ws=104.7198 rad/s
%Asynchronní rychlost
W=2*pi*n/60
W=43.0398 rad/s
%Poměrná rychlost
s'=W/Ws
s'=0.4110 -
%Ekvivalentní střídavý proud
Iekv=Iss*0.816
Iekv=7.0992 A
%Magnetyzační proud
Imi=R21/(Xmi*s)
Imi=0.2709 A
%Proud rotoru přepočtený na stator
I21=sqrt((Iekv^2)/(1+Imi^2))
I21=6.8522 A
%Brzdný moment
Mbr=(3*R21*I21^2)/(W0*s)
Mbr=12.0109 Nm
%Maximální brzdný moment
MBrm=(m/(4*pi*ns))*Xmi*Iekv^2
MBrm=23.8131 Nm
```

5. Porovnání výsledků měření s teoretickými výpočty

Protože výpočty brzdných charakteristik jsou prováděny ze zjednodušených vztahů a samotné měření momentů na dynamometru je v oblasti malých momentů obtížně měřitelné jsou výsledky naměřených a vypočtených charakteristik v oblasti malých stejnosměrných proudů dosti odlišné. Z grafů vidíme, že pro oblast jmenovitých proudů se shodují. Tyto momentové charakteristiky byly měřeny z toho důvodu, abychom ukázali použití brzdného zapojení, které se používalo u kroužkových motorů. Z průběhu charakteristiky je zřejmé, že na brzdnou charakteristiku mohl být motor přepnut z trojfázové charakteristiky např. při generátorickém brzdění. U stejnosměrných brzdných charakteristik s vykráceným rotorem, které se používají u frekvenčních měničů pro motory s kotvou nakrátko je shoda pro vypočtené a naměřené charakteristiky dobrá. Z jejich průběhu vidíme, že přepnutí na stejnosměrnou brzdnou charakteristiku může nastat až při nízkých frekvencích, tak abychom se při přepnutí dostali na stabilní větev momentové charakteristiky.

6. Závěr

Bakalářská práce se zabývá brzděním asynchronního motoru stejnosměrným proudem, které má specifické vlastnosti dané napájením střídavého stroje tímto stejnosměrným proudem.

V první řadě je rozebrán teoretický rozbor týkající se tohoto brzdění. Rozbor je zaměřen na to, jak vypadá schéma zapojení při brzdění, zapojení vinutí statoru, náhradní schéma, momentové charakteristiky a hlavně to jak najít vhodnou hodnotu budícího stejnosměrného proudu, aby byl motor magneticky využit. Aby byla tato podmínka splněna hledáme tedy vztah mezi stejnosměrným budícím proudem a efektivní hodnotou magneticky ekvivalentního střídavého proudu. Tento vztah můžeme pro různé varianty spojení statorového vinutí najít několika způsoby řešení. Je to vedle protiproudového brzdění často užívaný a účinný způsob brzdění. K výhodám patří příznivá energetická bilance při brzdění, možnost řízení budícího proudu a okolnost, že při zabrzdění do klidu je nulový brzdňý moment. Určitou nevýhodou je nutnost zvláštního zdroje stejnosměrného proudu, nerovnoměrné oteplování fází motoru při nesusměrném napájení vinutí statoru a malý brzdňý moment při velmi nízkých rychlostech.

Další část se zabývá náhradním schématem asynchronního motoru a stanovení jeho jednotlivých prvků. Aby mohly být stanoveny prvky definující náhradní schéma muselo být provedeno měření v laboratoři. Bylo provedeno měření pro zjištění odporů fází před oteplením a po zahřátí motoru a provedeny příslušné výpočty. Dále následovaly zkoušky motoru naprázdno a nakrátko ze kterých byly po vynesení grafických závislostí zjištěny potřebné parametry k definování náhradního schématu matematickým postupem.

Poslední část bakalářské práce se týká měření v laboratoři na asynchronním motoru, kdy statorovým vinutím prochází stejnosměrný proud, který způsobuje již zmíněné brzdění. Brzdění je provedeno pomocí usměrňovače pro dvě různá brzdňá zapojení statorového vinutí, různé budící proudy a s vřazeným spouštěcím rezistorem do obvodu kotvy. Po odpojení statoru od trojfázové napájecí sítě a po připojení na stejnosměrnou napájecí síť byly pomocí dynamometru a otáčkoměru změřeny momentové charakteristiky, které byly graficky vypracovány a ověřeny výpočtem. Z grafů je patrné, že při snižujícím se budícím proudem klesá maximální brzdňý moment. Brzdění stejnosměrným proudem umožňují i frekvenční měniče, proto bylo provedeno měření pomocí frekvenčního měniče bez spouštěcího rezistoru. Frekvenční měnič brzdí stejnosměrným proudem, jak zapojení statorového vinutí pro první brzdňé měření. Při vysokých rychlostech rotoru frekvenční měnič snižuje na základě frekvence rychlost rotoru a až se dostane na rychlost odpovídající maximálnímu brzdňému momentu, tak motor začíná být brzděn stejnosměrným proudem z frekvenčního měniče. Z tohoto měření byly vyneseny graficky momentové charakteristiky a ověřeny výpočtem.

7. Seznam použité literatury

- [1] NEBORÁK, Ivo, *Elektrické pohony-silaby do cvičení* (online). Ostrava : Vysoká škola Báňská, 2002 (cit. 2011-04-21). Dostupné z WWW: <www.homen.vsb.cz/sla~10>.
- [2] ČERNÝ, Miroslav. *Elektrické pohony I. Vysoké učení technické v Brně* : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1980. Brzdění stejnosměrným proudem, s. 257-264.
- [3] CAHA, Zdeněk; ČERNÝ, Miroslav. *Elektrické pohony*. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. 359 s.
- [4] FISCHER, Rolf. *Elektrische Maschinen*. München:Carl Hanser, 2000.Gleichstrombremsung , s. 239-241. ISBN 3-446-21262-0.
- [6] OLŠANSKÝ, Jindřich. *Elektrické stroje-cvičení- data projekce*, Ostrava, 2010
- [7] BAŠTA, Jan; KULDA, Vojtěch. *Měření na elektrických strojích 4*. Praha : SNTL, 1962. Těžní asynchronní motor s dynamickým brzděním, s. 167-171.
- [8] KOVÁŘ, Pavel. *Řízení asynchronního motoru pomocí frekvenčního měniče* (online). Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2010. 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/wwwbase/zavpracessouborverejne.php?file_id=29899>.
- [9] PETRÁSEK, František. *Elektrické stroje:laboratorní cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 1987. Měření trojfázových asynchronních strojů, s. 83-100.